



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ  
И ОБРАЗОВАНИЯ

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ ОБРАЗОВАНИЯ – 2022

Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции  
(г. Москва, 19 декабря 2022 г.)

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2023  
ISBN 978-5-7264-3202-1

Москва  
Издательство МИСИ – МГСУ  
2023

УДК 69+378  
ББК 38+74.4  
А43

- А43 **Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2022** [Электронный ресурс] : сборник докладов Третьей Национальной научной конференции (г. Москва, 19 декабря 2022 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, управление научной политики. — Электрон. дан. и прогр. (58 Мб) — Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2023. — Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/>. — Загл. с титул. экрана.  
ISBN 978-5-7264-3202-1

Настоящий сборник содержит доклады участников Третьей Национальной научной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2022», рекомендованные программным комитетом к публикации.

На конференции были представлены доклады преподавателей, специалистов, руководителей исследовательских центров, научных школ, научных руководителей магистрантов, аспирантов и докторантов.

Для научных работников, специалистов, аспирантов, магистрантов и обучающихся высших учебных заведений строительной отрасли.

*Научное электронное издание*

*Материалы публикуются в авторской редакции.  
Авторы опубликованных докладов несут ответственность за  
достоверность приведенных в них сведений.*

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2023

Подбор материала и ответственные за выпуск:  
*А.В. Дорошенко, К.Е. Миронов*

Управление научной политики тел. 7 (495) 287-49-14, вн. 2393; 2673  
E-mail: grant@mgsu.ru, MironovKE@mgsu.ru  
Сайт: <http://mgsu.ru/>  
[http://mgsu.ru/science/Nauchniye\\_meropr/](http://mgsu.ru/science/Nauchniye_meropr/)

Компьютерная верстка *К.Е. Миронова*

Для создания электронного издания использовано:  
Microsoft Word 2013, Adobe Acrobat Pro

Подписано к использованию 07.02.2023. Объем данных 58 Мб.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный строительный университет»  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

Издательство МИСИ – МГСУ.  
Тел.: (495) 287-49-14, вн. 14-23, (499) 183-91-90, (499) 183-97-95.  
E-mail: rio@mgsu.ru

**Организатор:** Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ).

**Дата проведения:** 19 декабря 2022 года.

**Место проведения:** Москва, Ярославское шоссе, 26, НИУ МГСУ.

**Тематика конференции:**

- Теория сооружений. Строительные конструкции.
- Строительные материалы и технологии.
- Градостроительство. Архитектура.
- Экологическая безопасность в строительстве и городском хозяйстве.
- Безопасность зданий и сооружений.
- Организационно-методические и общетехнические вопросы в строительстве.
- Цифровые технологии в строительстве.
- Инженерные системы и средства механизации в строительстве и ЖКХ.
- Комплексная безопасность в гидротехническом, энергетическом и геотехническом строительстве.
- Экономика и управление в сфере строительства и недвижимости.

**Научный комитет:**

- Акимов П.А. – ректор, председатель Научного комитета;
- Тер-Мартirosян А.З. – проректор, заместитель председателя Научного комитета;
- Галишникова В.В. – проректор, заместитель председателя Научного комитета;
- Волгин В.В. – проректор;
- Кайтуков Т.Б. – проректор;
- Фазылзянова Г.И. – проректор;
- Кабанцев О.В. – директор научно-технических проектов;
- Туснин А.Р. – директор ИПГС;
- Казарян А.Ю. – и.о. директора ИАГ;
- Анискин Н.А. – директор ИГЭС;
- Спицов Д.В. – директор ИИЭСМ;
- Филатов В.В. – директор ИЦТМС;
- Орлов А.К. – директор ИЭУКСН;
- Федорова Н.В. – директор филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи;
- Сидоров В.Н. – советник при ректорате.

**Рабочая группа:**

- Дорошенко А.В. – начальник УНП, руководитель Рабочей группы;
- Алексейцев А.В. – ответственный за научную работу ИПГС;
- Слепнев П.А. – ответственный за научную работу ИАГ;
- Макиша Н.А. – ответственный за научную работу ИИЭСМ;
- Сергеев С.А. – ответственный за научную работу ИГЭС;
- Федоров С.С. – ответственный за научную работу ИЦТМС;
- Канхва В.С. – ответственный за научную работу ИЭУКСН;
- Алексанин А.В. – ответственный за научную работу филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи;
- Казарян Р.А. – начальник сектора ОНИРС УНП;
- Евстратов В.С. – Начальник отдела планирования развития научной деятельности УНП;
- Миронов К.Е. – инспектор сектора ОНИРС УНП.



## Содержание

### Секция 1. Теория сооружений. Строительные конструкции

А.В. Марченко, А.Н. Зиятдинова, А.А. Крючков АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ СТАЛЬНОЙ ОБОЙМОЙ _____	19
М.Д. Антонов, А.В. Алексейцев, Н.С. Курченко ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОНА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО УСЛОВИЮ ПРОДАВЛИВАНИЯ ____	24
С.Ю. Савин, В.И. Колчунов, М.З. Шарипов МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ УДАРЕ _____	28
Е.В. Коркина, С.С. Кучеров, Е.В. Горбаренко ПОДБОР ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОСТЕКЛЕНИЯ ДЛЯ ЗДАНИЯ ТОРГОВОГО ЦЕНТРА В ГОРОДЕ ЧИТЕ _____	33
И.А. Калугин, А.М. Ибрагимов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛЬНОГО ШПУНТА, УСИЛЕННОГО ДВУТАВРОВОЙ БАЛКОЙ, ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ _____	38
В.В. Михаськин ВЛИЯНИЕ МЕСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ НА РАБОТУ СТАЛЬНОГО ИЗГИБАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА _____	44
А.Г. Тамразян, Т.А. Мацеевич НАДЕЖНОСТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ _____	50
М.А. Дежин, А.М. Ибрагимов ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАКЛАДКАХ _____	55
Н.А. Мишуренко, А.А. Семенов ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ _____	59
В.А. Люблинский, Н.Н. Люблинская, Е.Д. Полубарова, Ю.В. Хмелевская КРУЧЕНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ _____	64
А.А. Коянкин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЭТАПНО ВОЗВОДИМОЙ СБОРНО-МОНОЛИТНОЙ РАМЫ _____	70
Л.Ю. Ступишин, М.Л. Мошкевич ФОРМЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ БАЛОК НА КРИТИЧЕСКИХ УРОВНЯХ ЭНЕРГИИ _____	78
И.А. Самсонов, В.В. Василевский, И.М. Юдина К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ИЗ ТРУБ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СООРУЖЕНИЙ ТОННЕЛЬНОГО ТИПА _____	82
А.С. Торлин, А.М. Ибрагимов СЕГМЕНТЫ ПОЛИГОНАЛЬНОЙ АРКИ _____	87

В.П. Ярцев, В.М. Данилов ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЕЕДЕРЕВЯННОЙ БАЛКИ _____	95
--	----

А.Н. Лапина АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕПЛОЗАЩИТЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ _____	100
---	-----

## Секция 2. Строительные материалы и технологии

А.Ф. Иванов, А.В. Кочетков, Н.С. Семенова, И.А. Чижиков ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ _____	105
---	-----

Т.М. Хафизов, А.Х. Байбурин, А.Д. Овчинников ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СПОСОБОМ ОПУСКАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА _____	112
---	-----

Т.Ч. До, В.В. Столяров, Т.В. Сусанина, Д.В. Стибунов, С.С. Иноземцев СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИНКАПСУЛИРОВАННЫМ МОДИФИКАТОРОМ _____	117
--	-----

А.Д. Жуков, Б.И. Булгаков, Б.Б. Турганбаев, Б.М. Хожабергенев КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ КАРАКАЛПАКСТАНА _____	122
---	-----

А.Д. Жуков, И.В. Бессонов, Б.А. Демиссе, Р.С. Поудел ЛЕГКАЯ ШТУКАТУРНАЯ СИСТЕМА _____	128
--	-----

С.В. Самченко, М.А. Абрамов, А.Б. Османов ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛАКА ПРИ ЕГО АКТИВАЦИИ В ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ _____	133
---	-----

Н.В. Хохлова, Н.И. Шестаков, И.И. Титова, Н.В. Сячинова ТЕРМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕКУПЕРАЦИОННЫХ БИТУМОВ _____	138
---	-----

Л.Л. Макаров, С.В. Прохоров ПРОИЗВОДСТВО ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ МЕТОДОМ ПОЛУСУХОГО ВИБРОПРЕССОВАНИЯ. _____	145
---	-----

О.А. Ларсен, Д.О. Мелихов, И.О. Раббаа ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ _____	152
---	-----

Б.А. Ефимов, К.А. Тер Закарян, И.В. Бессонов, Е.Д. Михайлик ЗДАНИЯ С БЕСШОВНОЙ ИЗОЛЯЦИОННОЙ ОБОЛОЧКОЙ _____	157
--	-----

М.М. Мирзоян, А.И. Панченко, И.Я. Харченко, В.В. Воронин ИНЪЕКЦИОННЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ АКТИВНЫХ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ _____	163
--	-----

О.А. Васильева, А.Н. Суворова МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННОГО НА ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ _____	168
---	-----

Танг Ван Лам, Нгуен Чынг Хьеу, Б.И. Булгаков, О.В. Александрова ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ НА СВОЙСТВА ЛЕГКОГО ГАЗОБЕТОНА _____	171
--	-----

Н.В. Новиков ВЛИЯНИЕ БАРИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ _____	178
---	-----

Л.С. Заровная, Т.А. Лысенко ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ФУНДАМЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЛАБОРАТОРНЫМ МЕТОДОМ _____	184
Д.А. Лежебоков, А.В. Барковский ПОДБОР СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА РЯДОВОМ СЫРЬЕ ТУЛЬСКОГО РЕГИОНА _____	188
С.Ю. Обухова, А.О. Карпунина ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАСТИФИКАЦИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ _____	193
О.А. Ларсен, А.М. Бахрах ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА НА ГИДРАТАЦИИ НА УДЕЛЬНО СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ _____	199
К.В. Кочетов, А.Д. Попов СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ВЫБОРЕ ОКОН ПВХ _____	204
М.О. Асаматдинов, Н.З. Агафонова, А.М. Матьякубов, Р.К. Барлыков АРБОЛИТ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ КАРАКАЛПАКСТАНА _____	207
И.В. Козлова, М.О. Дударева ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ДОПИРОВАННОГО ОКСИДА ТИТАНА НА КОРРОЗИЮ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ _____	213
С.Д. Епихин, А.С. Иноземцев СПОСОБНОСТЬ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ПОЛЫХ МИКРОСФЕРАХ К САМОУПЛОТНЕНИЮ _____	218
О.А. Ларсен, Ю.И. Марков, В.К. Веселов, В.В. Васютин ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ ВЯЖУЩИХ _____	223
С.В. Шашкин, А.А. Аскадский, Т.А. Мацевич ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА _____	227
О.А. Ларсен, А.М. Бахрах, А.А. Солодов, К.А. Бутенко, В.К. Веселов ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА _____	231
Н.Р. Ванькова О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА НА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ _____	235

### Секция 3. Градостроительство. Архитектура

С.В. Образцова, Н.В. Бакаева ТИПОЛОГИЯ ПАРКОВ В КРУПНЫХ И КРУПНЕЙШИХ ГОРОДАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ (НА ПРИМЕРЕ МОСКВЫ) _____	244
Н.А. Романов, Н.В. Бакаева СОЦИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ПРОБЛЕМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА СУЗДАЛЬ) _____	250
С.А. Малахов, Ю.К. Бусел ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОРИЧЕСКОЙ ТИПОЛОГИИ «ДОМ-ДВОР» _____	257

Л.В. Анисимова, И.Ш. Гиззатова ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ _____	265
М. Ахмад, А.И. Финогенов ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОРОДОВ СИРИИ _____	272
Е.С. Шафрай ИЗУЧЕНИЕ РОЛИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ _____	276
Э.М. Аллахманов, А.И. Финогенов ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВОЧНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ КОММУНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ГОРОДОВ РОССИИ _____	281
В. Карягина, В.Н. Ткачев ГИБРИДНАЯ АРХИТЕКТУРА КАК ПРОИЗВОДНОЕ БИНАРНОЙ ОППОЗИЦИИ _____	285
И.Ю. Карасова, А.Н. Морозова СТИЛЬ МОДЕРН ПО ГОРОДУ ТАМБОВУ _____	291
А.В. Васильева ПРИНЦИПЫ СОВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ МУЗЕЙНО-ВЫСТАВОЧНЫХ ПРОСТРАНСТВ В УНИВЕРСИТЕТАХ _____	295
Д.С. Смагин, Л.А. Солодилова ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНОГО ЖИЛИЩА В УСЛОВИЯХ МАЛОГО ГОРОДА _____	299
А.Е. Балакина, А.С. Павлюк ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТИПОЛОГИИ ЖИЛЫХ ДОМОВ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ В СТРУКТУРЕ КАМПУСОВ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАН ПЕРИОДА СССР _____	306
Н.Ч. Зиядова ТИПОЛОГИЯ ОБЪЕКТОВ НЕЗАВЕРШЕННОГО СТРОИТЕЛЬСТВА _____	311
Е.В. Щербина, Али Биалал Абдулкави Номан ОПЫТ ТУРИСТИЧЕСКОГО ОСВОЕНИЯ ОСТРОВОВ _____	318
Н.Е. Дуненкова, А.А. Чернышов ЗОНА ВЛИЯНИЯ КАК ПЛАНИРОВОЧНАЯ ЕДИНИЦА В АНАЛИТИЧЕСКОМ СОПРОВОЖДЕНИИ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ _____	324
И.А. Устинов ВОСПИТАТЕЛЬНОЕ И СОЦИАЛЬНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ В 20-Е ГГ. XX В. И СЕГОДНЯ. _____	329
В. Карягина, В. Н. Ткачёв АНАЛИЗ РЕКРЕАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ТЕРРИТОРИИ ТРАКТОРНОГО ЗАВОДА В ГОРОДЕ ВОЛГОГРАД _____	333
Ф.З.Н. Дербак, В.Н. Ткачев ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТИПОЛОГИИ ЖИЛИЩА В АЛЖИРЕ _____	337
Е.Ю. Зайкова, В.В. Шапакина РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ РАЗВИТИЯ ПОСЕЛКОВ СРЕДНЕ- И МАЛОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКИ _____	346

А.В. Захаров, Е.В. Щукина ОБЪЕМНО ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ С ПРОДОЛЬНО НЕСУЩИМИ СТЕНАМИ _____	354
Е.Ю. Зайкова, Н.П. Гурьянов ЭКО-РЕНОВАЦИЯ РАБОЧИХ ПОСЕЛКОВ: РОЛЬ СОЦИАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В РАЗРАБОТКЕ КОНЦЕПЦИИ _____	359
И.Ю. Карасова, М.А. Мамонтова ИСТОРИЯ МОНАСТЫРЕЙ ТАМБОВСКОГО КРАЯ (МОНАСТЫРИ–ДУХОВНЫЙ СТОЛП ТАМБОВСКОГО КРАЯ) _____	368
О.Н. Дьячкова, А.А. Талеркина, А.В. Слобожан АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗДАНИЯ ДЕТСКОГО САДА СО ВСТРОЕННЫМИ «ЗЕЛЕНЫМИ» ИГРОВЫМИ ПЛОЩАДКАМИ _____	374
Е.Л. Дмитриева РАЗВИТИЕ ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ В ТИПОВЫХ СЕРИЯХ ЖИЛЫХ ДОМОВ НОВОСИБИРСКА _____	381
Ю.В. Алексеев СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ «ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО», «АРХИТЕКТУРА», «СТРОИТЕЛЬСТВО» В ОБРАЗОВАНИИ НА ОСНОВЕ НОВОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПЛАНИРОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОСЕЛЕНИЙ _____	385
П.Ф. Алиева, А.И. Ренц ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ПРИБРЕЖНОЙ ТЕРРИТОРИИ Р. ЯУЗА В Г. МЫТИЩИ). _____	399
А.В. Клинова, В.Н. Ткачев РЕКРЕАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЗАБРОШЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ _____	404
Т.В. Михайлова РЕНОВАЦИЯ ПРИГОРОДНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ РЕКРЕАЦИОННЫХ ЗОН (НА ПРИМЕРЕ Г.ВОРОНЕЖА) _____	409
Е.Н. Логунова, О.О. Смолина ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАРУЖНОЙ РЕКЛАМЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРНОГО ОБЛИКА ГОРОДОВ РОССИИ _____	415
Е.Г. Третьякова, А.А. Трипутень, Ж.В. Иванова УЛУЧШЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ Г. КРАСНОДАР _____	422
Али Салмо, Е.В. Щербина ИМИДЖ СИРИЙСКОГО ГОРОДА: ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ИСТОРИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ _____	429
П.А. Карплюк, Е.А. Аверьянова, К.Н. Назарова, А.А. Белал РАЗРАБОТКА ТУРИСТИЧЕСКОГО МАРШРУТА ПО ВАЛЬНЫМ СООРУЖЕНИЯМ ГОРОДА КАЛИНИНГРАДА _____	435
А.М. Донченко, Т.Д. Кириленко АКТУАЛЬНОСТЬ И ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ КУЛЬТУРНЫХ ЦЕНТРОВ В Г. РОСТОВЕ-НА-ДОНУ _____	440
Е.Е. Муравьева, А. Белал ВЛИЯНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ПЛАНИРОВКУ ГОРОДА НА ПРИМЕРЕ ЕРЕВАНА _____	444

М.М. Савах, П.А. Слепнев, А.А. Белал ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДОВ САР	451
И.Ю. Карасова, А.Р. Ганиева АРХИТЕКТУРА ПЕРВЫХ ТЕАТРОВ И КИНОТЕАТРОВ В Г.ТАМБОВЕ	458
С.А. Кочанова, Г.В. Павленко ПРОБЛЕМА КЛАССИФИКАЦИИ КОМФОРТНОЙ ЖИЛОЙ СРЕДЫ ПРИ СОЗДАНИИ СОВРЕМЕННОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ	463
Д.А. Маликова, И.Ю. Карасова ПУШКИНСКИЕ МЕСТА ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ	470
И.Ю. Карасова, Е.А. Лябина СОХРАНЕНИЕ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В Г. КИРСАНОВ.	477
А.В. Кувшинов, Т.Р. Забалуева ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОКЗАЛОВ В СЛОЖИВШЕЙСЯ ЗАСТРОЙКЕ КРУПНЫХ ГОРОДОВ	483
Д.Г. Паламарчук, Т.В. Пронина УСТОЙЧИВАЯ АРХИТЕКТУРА В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАТОПЛЯЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ	489
О.Н. Сокольская, А.С. Кривоносова БИОСФЕРНОСОВМЕСТИМАЯ КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА НА ПРИМЕРЕ Г. МАЙКОП	497
В.С. Одинцова, И.Ю. Карасова АРХИТЕКТУРНЫЙ ОБЛИК ДОРЕВОЛЮЦИОННЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ДЕТСКИХ ПРИЮТОВ В ГОРОДЕ ТАМБОВ.	503
Ю.Е. Нижегородцева, С.Д. Жехов СПЕЦИФИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ В ПОЙМАХ МАЛЫХ РЕК БОЛЬШИХ ГОРОДОВ	509
И.Ю. Карасова, Д.С. Федосова АНАЛИЗ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ Г. ТАМБОВА НА ПРИМЕРЕ СООРУЖЕНИЙ, ИМЕВШИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНУЮ ФУНКЦИЮ – БАНК	514
Е.А. Волкова, Ю.Е. Нижегородцева ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ОБРАЗОВАНИЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО КАМПУСА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	518
В.С. Клименок ХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ КИНОТЕАТРОВ	524
К.М. Мишурина, А.А. Белал ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И РЕСТАВРАЦИИ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ АЛЕКСАНДРОВСКОЙ СЛОБОДЫ	531
А.А. Ахба, А.А. Белал ПРОБЛЕМА НЕХВАТКИ ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА СУХУМ, АБХАЗИЯ	536
Е.А. Истомина, И.Ю. Карасова УСАДЬБА ОБОЛЕНСКИХ КИРСАНОВСКОГО РАЙОНА ТАМБОВСКОЙ ОБЛАСТИ – ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И УПАДКА	540

В.С. Бызова, О.О. Смолина ОСОБЕННОСТИ АЭРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ	547
Д.Р. Панкратова, О.О. Смолина СИМВОЛЫ НАЦИОНАЛЬНОГО КОЛОРИТА ГОРОДА ЯКУТСК	552
М. Нтахизанийе, А.Ю. Михайлов ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОК ТОЧЕК ДОСТУПА НА ГОРОДСКИХ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ	557

## Секция 4. Экологическая безопасность в строительстве и городском хозяйстве

В.А. Орлов, О.В. Мельник АНАЛИЗ ВОДНО-ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В БЕЗНАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ	564
О.Г. Примин, И.А. Аверкеев ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ SCOTCHKOTE® 2400	570
И.А. Евсиков, В.А. Фролькис АНТРОПОГЕННЫЙ ПОТОК ТЕПЛА, ВЫЧИСЛЕННЫЙ ПО ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА	577
Е.М. Коченкова, А.В. Денисов ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА	583
У.С. Канивец, Ж.М. Говорова РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ МАЛОМУТНЫХ ЦВЕТНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКИЕ И БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ	588
Е.В. Алексеев ЭЛЕКТРООКИСЛЕНИЕ СТОЙКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В СТОЧНЫХ ВОДАХ	593
А.А. Лезжев, С.Е. Алексеев ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД АЭРОПОРТОВ ОТ ТРУДНОУДАЛЯЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ	597
Д.В. Спицов, Тет Зо Аунг, А.Г. Первов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАНОФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ФУГАТА УСТАНОВОК ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОСАДКОВ СТАНЦИЙ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ	603
Е.Л. Головатенко, В.А. Маркин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШАХТНОЙ ВОДЫ В ОБОРОТНЫХ ЦИКЛАХ ВАКУУМ- НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ	613
О.А. Ларсен, В.К. Веселов, В.П. Васютин, В.А. Швецова, Ю.И. Марков АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ КРИОГЕННОГО УЛАВЛИВАНИЯ УГЛЕРОДА	617
Е.В. Алексеев, Т.С. Сидорова ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ЛИВНЕВЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОКОВ	623

## Секция 5. Безопасность зданий и сооружений

- П.С. Трунтов, Г.С. Быков, М.А. Логунова, В.И. Римшин  
ОБСЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО КОНТУРА МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА  
ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ \_\_\_\_\_ 631
- А.В. Корнилова, В.Р. Коновальцев  
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ И  
МИКРОСТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ \_\_\_\_\_ 636
- М.Н. Семенова, А.Л. Кришан, В.Л. Курбатов, С.И. Рощина  
КОНСТРУКТИВНАЯ НАДЕЖНОСТЬ КИРПИЧНОГО ЗДАНИЯ, НАЗНАЧЕННОГО  
ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ \_\_\_\_\_ 642
- А.Д. Филимонова, С.В. Марков, В.И. Римшин, В.Е. Румянцева  
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ФАКТИЧЕСКИ ВЫПОЛНЕННОГО ОБЪЕМА СКРЫТЫХ РАБОТ В  
РАМКАХ РЕМОНТА ФАСАДА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАПИТАЛЬНОГО  
РЕМОНТА ЗДАНИЯ \_\_\_\_\_ 648
- Д.С. Филимонов  
ПРИМЕНЕНИЕ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ В ЗДАНИЯХ НА  
ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ \_\_\_\_\_ 652
- А.В. Заев, А.В. Мозгов, Н.Б. Андросова  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЖИВУЧЕСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРЕЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПРИ  
ЗАПРОЕКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ \_\_\_\_\_ 658
- Г.Д. Шмелев  
ОБОСНОВАНИЕ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ДЕМОНТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ \_\_\_\_\_ 663
- Д.В. Якимишин, Г.С. Быков, В.И. Римшин  
ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НУЖД КАПИТАЛЬНОГО  
РЕМОНТА \_\_\_\_\_ 668
- Р.Н. Никонов  
ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИГРУЗА ЗАБОЯ ПРИ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ НА  
ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВОГО МАССИВА \_\_\_\_\_ 672
- А.В. Исаев  
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСКЛЮЧЕННОЙ ИЗ РАБОТЫ РАСПОРКИ В  
ГЛУБОКОМ КОТЛОВАНЕ \_\_\_\_\_ 684
- Ю.О. Бакрунов, Е.Ю. Васильева  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВИМ-  
ТЕХНОЛОГИЙ \_\_\_\_\_ 691

## Секция 6. Организационно-методические и общетехнические вопросы в строительстве

- Д.М. Мазурин, М.Е. Дементьева  
ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ ОТ ДЕМОНТАЖА  
ЗДАНИЙ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ \_\_\_\_\_ 698



Б.А. Гамов, А.А. Морозенко, И.А. Енговатов ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАРУБЕЖНЫХ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ИНОСТРАННЫХ КОМПАНИЙ _____	704
А.Н. Малахова ЭЛЕКТРОННЫЙ ПАСПОРТ ЗДАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НЕМУ _	709
Е.А. Король, Ю.О. Кустикова, Е.В. Панкова ПРОВЕРКА ВЕЛИЧИН НАПРЯЖЕНИЙ В АРМАТУРЕ И СВЯЗЯХ СТЫКОВ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ _____	715
М.Ф. Семененко УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ РИСКАМИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ МАССОВОЙ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ _____	720
Е.А. Король, З.Х. Чипова ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ОБДЕЛКИ, ОГРАЖДЕНИЯ СТАРТОВОГО И ПРИЕМНОГО КОТЛОВАНОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНОГО ТОННЕЛЯ ЗАКРЫТЫМ СПОСОБОМ _____	730
Е.О. Кочурина, Д.В. Топчий, В.С. Чернигов, А.Ю. Кочетков ФОРМИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ НА ОБЪЕКТАХ ГРАЖДАНСКОГО ВЫСОТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА __	734
О.А. Король, Г.Л. Акоюн, Р.С. Петросян ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОДХОД В ОЦЕНКЕ ТРУДОЗАТРАТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ НА СТРОИТЕЛЬСТВО И КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ ЗДАНИЙ _____	739
Д.А. Таскина, А.И. Фахрутдинов, В.И. Римшин ОБСЛЕДОВАНИЕ КРОВЛИ МНОГОКВАРТИРНОГО ЖИЛОГО ДОМА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ. _____	743
С. Аббасипаям, М.А. Гордеев-Бургвиц НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ, СТОЯЩИХ ПЕРЕД СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛЮ _____	746

## Секция 7. Цифровые технологии в строительстве

И.А. Звонов ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ РЕЕСТРОВ НОРМАТИВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ _____	753
Д.Ш. Гасанов, О.С. Ким, А.В. Баулин ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ И ЦИФРИЛИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ И СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ _____	758
К.А. Шумилов, Ю.А. Гурьева МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СТЕНЫ И НАВЕСА В СВЯЗКЕ GRASSHOPPER – ARCHICAD _____	764
В.Н. Орлов, М.В. Гасанов АНАЛИЗ АСПЕКТА НЕЛИНЕЙНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ __	768
А.Р. Булина, Н.А. Солопова АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ _____	773

И.А. Шмаров, В.А. Козлов, Е.В. Коркина ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ РАСЧЕТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСВЕЩЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ СВЕТОВОДАМИ ЕСТЕСТВЕННОГО СВЕТА _____	780
В.Г. Куликов ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА АЛГЕБРАИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ СООРУЖЕНИЙ КПД _____	789
О.Н. Кузина, А.Ю. Козина АТРИБУТИВНАЯ СХЕМА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПРОЕКТА ОРГАНИЗАЦИИ ДЕМОНТАЖА _____	794
Л.А. Адамцевич, Ю.В. Камаева ИСПОЛЬЗОВАНИЕ VR, AR, MR-ТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА _____	800
К.С. Семёнова, Е.В. Макиша АВТОМАТИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ ОБЩИХ ДАННЫХ _____	805
Ж.В. Касымов СПОСОБЫ АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНО- ПЛАНИРОВОЧНОГО РЕШЕНИЯ ЗДАНИЯ _____	813
Л.В. Мовсесова ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЭТАПНОГО ВОЗВЕДЕНИЯ ЗДАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕЖИМА «МОНТАЖ» _____	820
Н.А. Горяев, Ахмед Раафат Али Ахмед, Мохамед Хассан Аттия Мохамед Аттия, Эль Мавед Ахмад ОБЛАЧНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФОТО КОНТРОЛЛИНГА ИСТОРИИ ВЫПОЛНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ _____	829
В.В. Горяева, С.В. Парфенов АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КООРДИНАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ _____	836
И.В. Шанюкевич, Е.Д. Курганов КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ «УМНОГО ЗДАНИЯ» НА ПРИМЕРЕ ДЕТСКОГО ДОШКОЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ _____	843
Н.В. Князева, С.А. Шологин РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРОВЕРКИ АТРИБУТИВНОЙ НАПОЛНЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ _____	851
В.С. Канхва, К.Ф. Галеев АЛГОРИТМ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА МИКРОУРОВНЕ _____	856

## Секция 8. Инженерные системы и средства механизации в строительстве и ЖКХ

В.В. Балалов ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО И ЛОГИКО- ВЕРОЯТНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ _____	863
С.М. Усиков, В. Прилуцкий СОВОКУПНАЯ ТЕПЛОВАЯ ИНЕРЦИЯ ОТАПЛИВАЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ И ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА _____	869

Е.Ю. Анисимова ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕЛИОУСТАНОВОК В ЧЕЛЯБИНСКЕ _____	876
Д.В. Спицов, А.М. Павелкова ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНООБМЕННЫХ УСТАНОВОК ВОДОПОДГОТОВКИ КОТЕЛЬНЫХ _____	883
И.Ю. Пурусова ОРГАНИЗАЦИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОКРАЩЕНИЮ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЯХ _____	888
Д.В. Бубнов, К.А. Волнушкина ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МЕХАНИЗАЦИИ ПОДВОДНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ _____	893
Г.Н. Громов, В.И. Римшин, И.М. Незаметдинов ОБ ОБЪЕДИНЕНИИ КОНЦЕПЦИЙ BIM И ГИС ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕШЕНИЙ НАРУЖНЫХ СЕТЕЙ ВИВ _____	900
Е.Г. Малявина, А.А. Фролова ВЛИЯНИЕ СТОИМОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО СЛОЯ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ НА ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЙ УРОВЕНЬ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ЗДАНИЯ _____	906
С.Д. Перевалов СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА _____	914
В.Р. Иноземцева СРАВНИТЕЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ И ИК-ГОРЕЛОК _____	920
И.А. Клочков, М.А. Степанов КОНЦЕВЫЕ ЗАДЕЛКИ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КЛИНОВЫХ МУФТ И СИСТЕМ END-STOP. _____	927
А.С. Кулаков ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ ТРЕБУЕМЫХ УСЛОВИЙ МИКРОКЛИМАТА ЗАКРЫТОГО КОННОСПОРТИВНОГО МАНЕЖА _____	931
О.Н. Медведева ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТА ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ _____	938

## Секция 9. Комплексная безопасность в гидротехническом, энергетическом и геотехническом строительстве

С.А. Платонов, О.Е. Руденко ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ДАМБЫ ШЛАМОНАКОПИТЕЛЯ ПРИ АВАРИИ _____	946
З.Г. Тер-Мартirosян, А.З. Тер-Мартirosян, Ю.В. Ванина НДС ГРУНТОВОГО МАССИВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ ВБЛИЗИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВЫЕМКИ _____	954
Е.А. Муравьева, А.В. Манько О ПРИНЦИПЕ ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СКАЛЬНОМ МАССИВЕ _____	958

А.Н. Хворова МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ ТРЕЩИНОВАТО-ДЕФОРМИРОВАННОГО ПЛАСТА.	964
---	-----

## Секция 10. Экономика и управление в сфере строительства и недвижимости

Ю.Я. Еленева, В.В. Глазкова МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ	969
Д.З. Искандаров, С.М. Бороздина КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФИНАНСОВО-ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОЙ СФЕРЫ В ОСОБОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ	976
М.Ю. Мишланова, В.О. Щербанёва АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ ВВЕДЕНИЯ ПРОЕКТНОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ В РФ	983
Е.А. Баутин ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ BIM В ПРОЕКТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ	988
Н.Г. Верстина, С.С. Игитханян ИМУЩЕСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС ВУЗА КАК ПРАВОВАЯ, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И УПРАВЛЕНЧЕСКАЯ КАТЕГОРИЯ	993
М.С. Пантелеева, Д.И. Никишов ЦЕНООБРАЗОВАНИЕ НА КОММУНАЛЬНЫЕ УСЛУГИ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ ЗАТРАТАМ	999
О.В. Суходоева, И.В. Каракозова КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ КАК ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ УКРУПНЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТОИМОСТИ	1007
О.С. Голубова РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЗАТРАТ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ	1015
А.А. Савостина, Ю.О. Бакрунов СОСТОЯНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЛИФТОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ САНКЦИЙ	1021
О.Н. Яркова, Н.А. Сидоренко О ПОДХОДЕ К ФОРМИРОВАНИЮ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА	1026
К.В. Кузьмина ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ СТРОИТЕЛЬСТВА	1033
А.А. Судакова, И.Г. Лукманова ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АКТИВИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РАМКАХ РАЗВИТИЯ ТУРИСТИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ В РОССИИ	1037
Р.Т. Алиева ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОГО СЕКТОРА АЗЕРБАЙДЖАНА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ.	1042

А.В. Бородацкая

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В  
КОНТЕКСТЕ ЕГО СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

---

1049

Секция 1. Теория сооружений.  
Строительные конструкции

# АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ СТАЛЬНОЙ ОБОЙМОЙ

А.В. Марченко<sup>1</sup>, А.Н. Зиятдинова<sup>2</sup>, А.А. Крючков<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д, 46,

<sup>1</sup>mar9895@yandex.ru

<sup>2</sup>sokoleen@yandex.ru

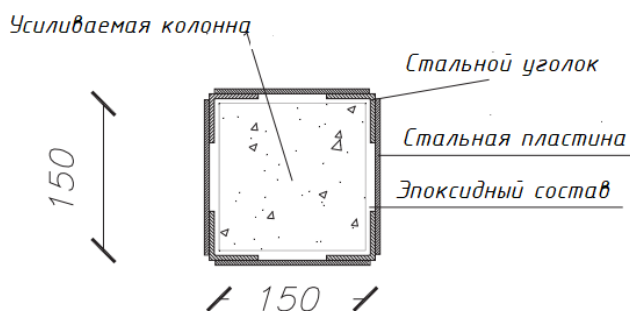
<sup>3</sup>krjuchkow@yandex.ru

## Аннотация

В данной статье проанализирована группа исследований по усилению железобетонных колонн. Основными параметрами исследований являлись: тип внешнего усиления, вид затирки для заполнения пустот между стальными обоймами и железобетонной колонной, размер стальных уголков, расстояние между полосовыми пластинами, предел текучести стали каркаса; прочность бетона на сжатие в колонне; размер планок; добавление дополнительных планок на концах каркаса; и коэффициент трения между слоем строительного раствора и стали каркаса. В результате исследований были сделаны выводы об эффективности метода усиления железобетонных колонн стальными обоймами, была выявлена причина разрушения усиленных колонн и приведена оценка использования альтернативного адгезионного материала при усилении колонны, приведен результат экспериментов по усилению железобетонной колонны путем присоединения стальных уголков к оголовку колонны.

## ВВЕДЕНИЕ

Существует множество способов увеличить несущую способность и снизить деформативность железобетонных колонн. Добавление новой бетонной оболочки с дополнительным усилением, использование внешних стальных уголков и горизонтальных полос [1], а также обертывание исходной секции колонны армированными полимерными волокнами [2] являются наиболее популярными методами усиления [3]. Усиление железобетонных колонн с помощью стальных уголков, соединенных планками, является одним из самых дешевых и довольно простых, и доступных методов. В этом способе усиления 4 стальных уголка устанавливаются на цементно-песчаный раствор и прижимаются к колонне. После этого к уголкам по всей длине конструкции привариваются поперечные планки с шагом 400-600 мм. (рис 1). Этот метод усиления наиболее рационален для колонн с небольшой гибкостью, когда нужно сохранить площадь помещений или требуется провести работу в сжатые сроки. Одним из популярных в настоящее время способов восстановления и усиления железобетонных колонн является использование полимерных волокон в виде обойм. Основным недостатком данного способа является их довольно высокая стоимость, и требования к температуре при монтаже и дальнейшей эксплуатации.



**Рис. 1.** Усиление колонны стальными уголками с планками с заполнением пустот эпоксидным составом

Многими исследователями, с целью изучения максимальной несущей способности после усиления, проведены эксперименты с квадратными колоннами, усиленными стальной обоймой [3].

Целью данной статьи является изучение методов усиления железобетонных колонн стальными обоймами различной конфигурации для определения наиболее эффективных и экономически выгодных вариантов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В первой группе экспериментов к колоннам были приварены четыре стальные пластины с четырьмя уголками по краям. Для соединения стальных пластин с поврежденной поверхностью железобетонной колонны были использованы два метода склеивания. В первом случае зазор между стальными пластинами и колонной был заполнен с помощью эпоксидной смолы и мелкого песка. В то время как во втором случае для приклеивания стальной оболочки к бетону использовался цементно-песчаный раствор.

Во второй группе экспериментов были проведены исследования [5] 39 образцов, размерами 300x300x1500 мм. Стальной оголовки и башмак были соединены со стержнем колоны при помощи арматуры.

Стоит учесть, что стальные уголковые профили обоймы могут как прерываться (рис. 2), так и быть сплошными по высоте колонны (рис. 3). Обойма полностью обвязанной колонны в отличие от частично обвязанной подразумевает применение сплошных стальных уголков [6].

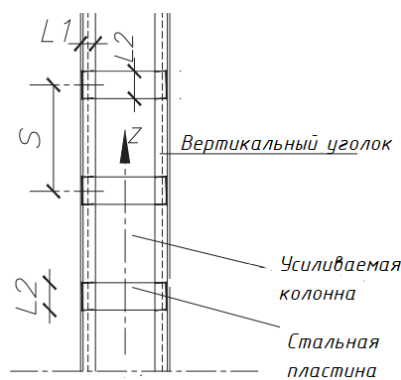


Рис. 2. Стальная обойма усиленной железобетонной колонны

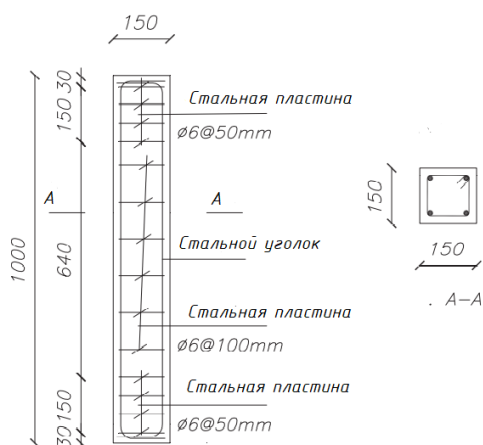


Рис. 3. Сплошная стальная обойма усиленной железобетонной колонны

В исследованиях Бадра М. [7] изучалось поведение восьми прямоугольных арматурных железобетонных колонн с использованием бетона с низкой прочностью на сжатие (около 200 кг/см<sup>2</sup>), которые были усилены стальной оболочкой. Все образцы представляли собой прямоугольные железобетонные колонны с соотношением сторон 1 к 2. Стальная оболочка состояла из четырех вертикальных уголков, размещенных по краям



колонны, и горизонтальных полосовых пластин, которые были распределены по длине колонны и приварены к углам. Параметрами исследования были размер уголков, расстояние между полосовыми пластинами и использование анкерных болтов в середине длинной стороны колонн.

Исса М. и др. [8-12] провели исследование для оценки поведения железобетонных колонн, усиленных снаружи стальной оболочкой или волокнистым композитом, при осевых нагрузках.

Это исследование состояло из двух этапов, первый этап включал теоретический расчет, а второй – экспериментальные исследования.

Экспериментальная часть, представленная в их исследовании, включала шесть прямоугольных железобетонных колонн с одинаковым поперечным сечением 150x200 мм и высотой 1200 мм. Стальная оболочка состояла из четырех вертикальных уголков по краям колонны и горизонтальных стальных пластин, приваренных к углам и распределенных по высоте колонны. Волокнистые композиты состояли из листов полимера, армированного углеродным волокном (углепластик), обернутых вокруг колонны. Основным параметром исследования - тип внешнего усиления. Для стальной оболочки переменными приняты размеры уголков по краям колонны и расстояния между стальными пластинами.

Адам С. и др. [12-14] провели эксперименты на асимметрично нагруженных железобетонных колоннах, усиленных стальными каркасами, а также рассчитали математические модели с использованием метода конечных элементов для проверки полученных экспериментальных значений. Также проведен параметрический анализ влияния каждого из параметров на поведение железобетонных колонн, усиленных стальными каркасами. В исследовании учитывались следующие параметры: размер углов; предел текучести стали каркаса; прочность бетона на сжатие в колонне; размер планок; добавление дополнительных планок на концах каркаса; и коэффициент трения между слоем строительного раствора и стали каркаса.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Из данных исследований получены следующие результаты:

1. Использование стальных обоев, является эффективным способом усиления. Увеличение несущей способности составляет от 1,35 до 2,1 раз от несущей способности не усиленных колонн. Этот результат обусловлен работой внешнего стального каркаса и способностью стального уголка выдерживать часть приложенной осевой нагрузки. Разрушение большинства усиленных образцов произошло из-за изгиба стального уголка с последующим разрушением железобетонных колонн. Также было замечено, что деформативность при осевом сжатии усиленной колонны в большинстве случаев уменьшилась на 50% по сравнению с деформативностью при осевом сжатии не усиленных колонн.

2. Во всех испытаниях усиленных колонн разрушение в большинстве случаев было вызвано изгибом вертикальных уголков после их прогиба. Податливости горизонтальной планки не наблюдалось. Это связано с относительно большим размером горизонтальных планок по отношению к вертикальным уголкам.

3. Использование эпоксидной затирки вместо цементной не улучшило характеристики усиленной колонны. В первой группе исследований при невысоком уровне нагрузки наблюдалось отслоение пластин и непрерывный треск, исходящий от слоя мастики между пластиной и углом, вплоть до внезапного разрушения в конце процесса испытания. Это было связано с низкой податливостью и хрупкостью используемого адгезионного материала. Следовательно, экономичнее использовать цементный раствор для заполнения зазора между стальным каркасом и железобетонной колонной из-за более высокой стоимости эпоксидного раствора по сравнению с цементно-песчаным раствором.

4. Прямое присоединение вертикальных уголков к оголовку и башмаку колонны позволяет передавать нагрузку непосредственно на обойму. Все стальные уголки, соединенные таким образом, показали устойчивость перед разрушением усиленной колонны. Предельная несущая способность колонн составила от 1,35 и 1,90 от таковых у не усиленных колонн.

5. Уменьшение расстояния между горизонтальными стальными планками улучшили характеристики усиленных колонн. Также использование анкерных болтов для соединения планок в середине длинной стороны колонны повысило её прочность на 16%.

6. Из экспериментального исследования Исса М. и др. сделан вывод, что увеличение площади стальных уголков и уменьшение расстояния между планками стальных оболочек увеличивают предельную несущую способность и снижают деформативность усиленных колонн.

7. По результатам параметрического исследования сделан вывод, что увеличение размера горизонтальных планок приведет к лучшей передаче нагрузок между каркасом и колонной с помощью механизма напряжения сдвига.

## ВЫВОДЫ

Использование стальных обойм при усилении железобетонных колонн – наиболее эффективный способ повышения прочности на сжатие элементов. Заполнение зазоров между железобетонной конструкцией и стальными частями обоймы цементно-песчаным раствором можно считать наиболее экономичным и надежным вариантом ввиду сравнительно меньшей стоимости материалов и лучшими прочностными характеристиками по сравнению с эпоксидными составами. Крепление стальных планок обойм анкерными болтами и уменьшение расстояния между планками способствует увеличению прочностных характеристик, а присоединение стальных уголков к оголовкам, и башмакам позволяет увеличить прочность усиливаемой железобетонной колонны на изгиб.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Крючков А.А.* Теоретическое и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных стержневых элементов с учетом влияния поперечной силы// *Материалы Международных академических чтений «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения»* – Курск, 2006. – С. 264-267
2. *Леонова А.Н., Софьяников О.Д., Кривенкова Т.В.* Особенности усиления строительных конструкций композитными полимерными материалами в условиях высоких и низких температур// *Журнал «Перспективы науки»* – Краснодар, 2019. С. 64-69
3. *Ramiez J.L.* Ten, Concrete column repair methods, *Constr. Build. Mater.* 10 (3) (1996) 195–202.
4. *Данилов С.В.* Технические решения по устройству оголовка конструкции усиления железобетонной колонны// *Материалы Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии»* – Могилев, Беларусь, 2019. С. 242-243
5. *Теряник В.В., Борисов А.О.* Усиление сжатых железобетонных колонн обоймами// *Журнал «Жилищное строительство»* – Тольятти, 2010.– №2 – С. 24-25
6. *J.L. Ramiez, J.M. Blrcena, J.I. Urreta, J.A. Shchez,* Efficiency of short steel jackets for strengthening square section concrete columns, *Const. Build. Mater.* 1. I I (о5–6) (1997) 345–352.
7. *M. Badr,* Experimental behaviour of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket, *HBRC J.* 2 (2) (2006) 23.
8. *M.S. Issa, S.M. Elzeiny, E.H. Aly, I.M. Metwally,* Investigation of reinforced concrete columns strengthened externally with steel jacket and fiber composite, *Civ. Eng. Res. Mag.* 30 (3) (2008) 831–848.
9. *G. Campione,* Strength and ductility of RC strengthened with steel angles and strips, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 800–807.
10. *R. Montuori, V. Piluso,* Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load, *Eng. Struct.* 31 (2) (2009) 539–550.
11. *L. Cirtek,* RC columns strengthened with bandage – experimental programme and design recommendations, *Constr. Build. Mater.* 15 (8) (2001) 341–349.
12. *J.M. Adam, S. Ivorra, F.J. Pallare's, E. Gime'nez, P.A. Caldern,* Axially loaded RC columns strengthened by steel caging. Finite element modeling, *J. Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2265–2276.

13. E. Gimernez, J.M. Adam, S. Ivorra, P.A. Caldern, Influence of strips configuration on the behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips, *Mater. Des.* 30 (2009) 4103–4111.
14. P.A. Calderon, J.M. Adam, S. Ivorra, F.J. Pallare's, E. Gime'nez, Design strength of axially loaded RC columns strengthened by steel caging, *Mater. Des.* 30 (2009) 4069–4080

# ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОНА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПО УСЛОВИЮ ПРОДАВЛИВАНИЯ

М.Д. Антонов<sup>1</sup>, А.В. Алексейцев<sup>2</sup>, Н.С. Курченко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>*mishany96969@mail.ru*

<sup>2</sup>*aalexw@mail.ru*

<sup>3</sup>*ms.kurchenko@mail.ru*

## Аннотация

Согласно актуальным строительным нормам необходимо обеспечить механическую безопасность зданий и сооружений на протяжении всего жизненного цикла объекта. В результате ошибок при проектировании или строительства, либо неправильной эксплуатации конструкции приобретают локальные повреждения, которые могут повлиять на их несущую способность, особенно в случае возникновения аварийных нагрузок. В настоящее время активно проектируются объекты с плоскими монолитными перекрытия. Особое место в обеспечении несущей способности данных конструкций занимает работа узла сопряжения колонны и плиты на продавливание. В действующих нормативных документах нет критериев, по которым можно было бы оценить несущую способность данного узла при локальных повреждениях. В данной работе проведен обзор работ по влиянию начальных повреждений на несущую способность при аварийных ситуациях. Исследован механизм разрушения узла сопряжения колонны и плиты. Предложена методика по оценке несущей способности на продавливание с учетом локальных повреждений.

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании зданий и сооружений необходимо обеспечивать механическую безопасность на протяжении всего жизненного цикла объекта. Во время эксплуатации зданий возникают ситуации, при которых строительные конструкции приобретают дефекты. [7,8] Проблема учета работы конструкций с учетом данных локальных повреждений недостаточно изучена. Согласно имеющимся исследованиям, повреждения и дефекты влияют на работу конструкции при воздействии проектных нагрузок. Однако ещё больший интерес заключается в исследовании влияния начальных повреждений на работу конструкций при запроектных воздействиях. [1,8] Особое внимание при проектировании зданий с учетом возникновения аварийных ситуаций уделяется развитию пластических деформаций при работе конструкций, максимальному исключению случаев хрупкого разрушения. Разрушение конструкций при продавливании носит хрупкий характер, при этом в немногочисленных исследованиях наблюдается что данный тип нагружения приводит к цепному разрушению соседних конструкций. [3] Однако информации о учете степени повреждений данного узла до возникновения аварийной ситуации и влиянии этих повреждений на работу каркаса в целом крайне мало.

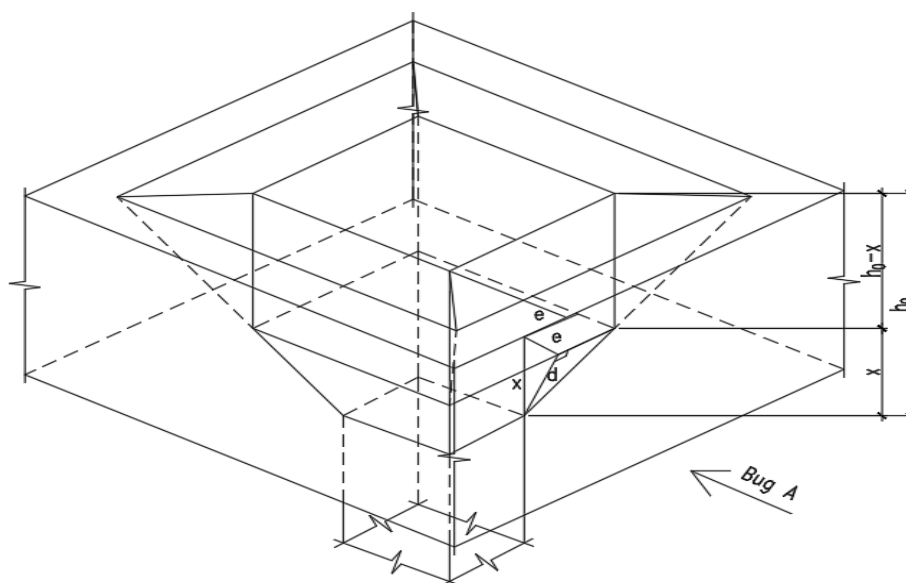
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При рассмотрении данного вопроса необходимо отметить работы отечественных и зарубежных ученых по работе монолитных каркасов в условиях аварийных воздействий. [4,10] Было установлено что значительное влияние на работу конструкции оказывает соблюдение требований по неразрывности, что помогает способствует развитию пластических деформаций и переходу системы в вантовый механизм. [2,9] Однако единого мнения о угле поворота узла сопряжения колонны и плиты, а также предельном прогибе конструкции плиты нет. При этом ученые сходятся во мнении, что одним из ключевых факторов, обеспечивающих работу устойчивость системы при запроектном

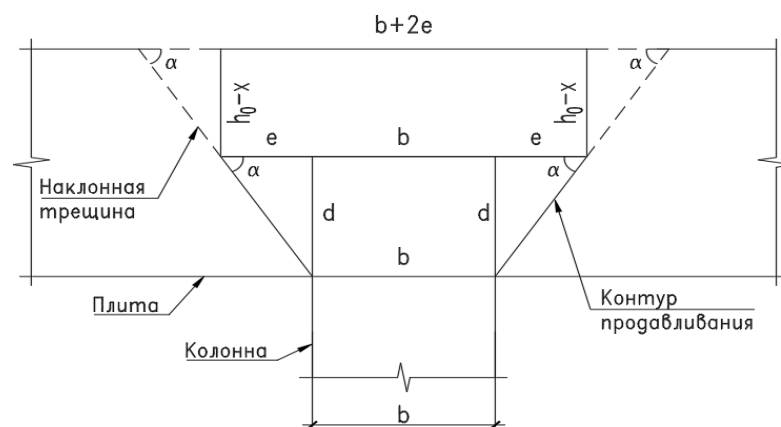
воздействию является живучесть узла сопряжения колонны и плиты. [3,5] Согласно имеющимся на данный момент работам [6,9] установлено, что с увеличением скорости воздействия нагрузки на конструкцию увеличивается её несущая способность ввиду увеличения физико-механических характеристик арматуры и бетона. С другой стороны, исследователи [2] отмечают тенденцию к хрупкому разрушению конструкций в данных ситуациях. При этом в имеющейся литературе, крайне мало информации об учете фактического состояния конструкций с учетом повреждений при рассмотрении аварийных ситуаций. С одной стороны, исследователи отмечают благоприятное воздействие локальных дефектов на несущую способность монолитных каркасов, так как наличие повреждений снижает воздействие инерционных сил. С другой стороны, не совсем понятна граница степени повреждений при которой можно говорить о том, что конструкция будет разрушаться с развитием пластических деформаций с исключением случаев хрупкого разрушения. Имея понимание о конечной степени повреждений для монолитных каркасов при определенной нагрузке и конфигурации каркаса, мы могли бы использовать статический расчет, не беспокоясь о влиянии динамических эффектов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования данного вопроса были рассмотрены испытания на продавливание узлов сопряжения колонны и плиты. Отмечается общая тенденция, связанная с тем, что непосредственно перед разрушением в сжатой зоне колонны происходит накопление значительные пластических деформации и деформаций сдвига в бетоне, в зависимости от процента продольного армирования образца, что приводит в конечном счете к хлопкообразному разрушению от сдвига в указанной области. В то же время с растянутой грани формируется наклонная трещина, которая по мере увеличения нагрузки продвигается к сжатой зоне бетона.



**Рис. 1.** Расчетная схема узла сопряжения колонны им плиты при продавливании



**Рис. 2.** Расчетная схема вид А.

На основании отмеченного по результатам испытаний механизма разрушения была предложена модель по определению несущей способности образцов на продавливание. Выделены 2 основные зоны сечения, работающие на срез и на растяжение.

1. Определяем площадь бетона сжатой зоны, работающей на срез в виде площади 4-ех наклонных трапеций:

$$A_1 = 4 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot (b + b + 2 \cdot e) \cdot d \right]$$

где  $b$  – длина контура опорной части;  
 $e$  – длина проекции наклонной трещины;  
 $d$  – высота наклонной трапеции ;

Тогда из приведенной схемы угол наклона ( $\alpha$ ) трещины равен:

$$\sin(\alpha) = \frac{x}{d} \rightarrow d = \frac{x}{\sin(\alpha)} \quad \text{ctg}(\alpha) = \frac{e}{x} \rightarrow e = x \cdot \text{ctg}(\alpha)$$

Далее необходимо учесть вклад зоны, работающей на растяжение. Для этого определим площадь растянутой зоны бетона, которую можно представить в виде площади 4-ех прямоугольных участков:

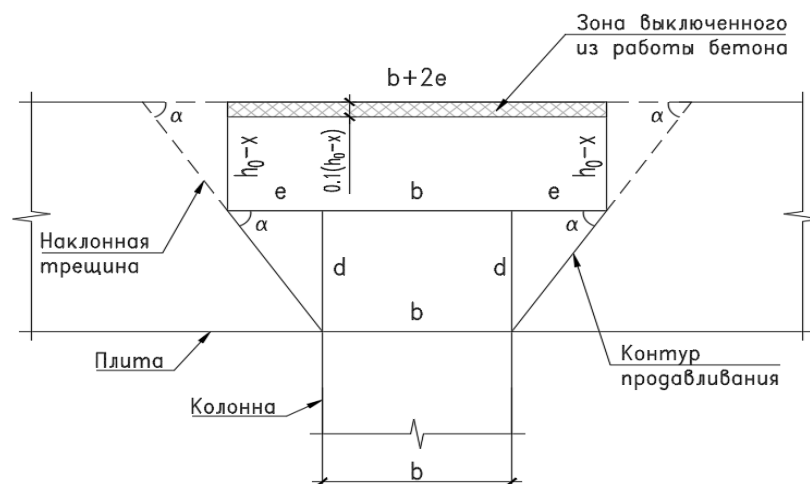
$$A_2 = 4 \cdot [(b + 2 \cdot e) \cdot (h_0 - x)]$$

3. Тогда окончательная несущая способность на продавливание будет равна:

$$F_{b,ult} = A_1 \cdot R_{sh} + A_2 \cdot R_{bt}$$

где  $R_{sh}$  - прочность бетона на срез:

$$R_{sh} = 2 \cdot R_{bt} \cdot k$$



**Рис. 3.** Расчетная схема вид А с учетом повреждений

Анализируя данные испытаний установлено что при проведении испытаний по контуру конструкции развиваются радиальные и тангенсальные трещины с шириной раскрытия до 0.3 мм. Предполагаем, что повреждения затрагивают растянутую зону бетона. В первом приближении примем, что из работы может выключиться зона бетона высотой  $0.1(h_0-x)$  (см. рис. 3). Тогда площадь растянутой зоны с учетом повреждений по предложенной методике будет равна:

$$A_2 = 4 \cdot [(b + 2 \cdot e) \cdot 0.9 \cdot (h_0 - x)]$$

## ВЫВОДЫ

По результатам работы предложена методика расчета несущей способности на продавливание, которая приближена к работе бетона в результате исследований. Согласно предложенной методике был предложен подход по учету повреждений при определении несущей способности с учетом локальных повреждений. Для верификации данного подхода планируется провести испытания узлов сопряжения колонны и плиты на продавливание. По результатам испытаний планируется определить уровни повреждения узла сопряжения колонны и плиты для лучшего понимания фактической несущей способности перед наступлением аварийного воздействия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексейцев А. В., Антонов М. Д.* Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждениях плит продавливанием // *Строительство и реконструкция.* – 2021. – №. 4. – С. 23-34.
2. *Алмазов В. О., Плотников А. И., Расторгуев Б. С.* Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // *Вестник МГСУ.* – 2011. – №. 2-1. – С. 15-20.
3. *Кабанцев О. В., Митрович Б.* К выбору характеристик предельных состояний монолитных железобетонных несущих систем для режима прогрессирующего обрушения // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности.* – 2018. – №. 6. – С. 234-241.
4. *Кабанцев О. В., Горбатов С. В., Песин К. О.* Оценка влияния локальных дефектов перекрытия на основе учета поэтапного изменения расчетной схемы под нагрузкой // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2015. – №. 2 (49).
5. *Колчунов В. И., Ключева Н. В., Бухтиярова А. С.* Сопротивление пространственных узлов сопряжения железобетонных каркасов многоэтажных зданий при запроектных воздействиях // *Строительство и реконструкция.* – 2011. – №. 5. – С. 21-32.
6. *Медянкин М. Д.* Деформирование бетона при статико-динамическом нагружении железобетонных конструкций. Дисс. канд. техн. Наук – М., МГСУ, 2021. 163 с.
7. *Тамразян А.Г., Алексейцев А.В.* Эволюционная оптимизация нормально эксплуатируемых железобетонных балочных конструкций с учетом риска аварийных ситуаций // *Промышленное и гражданское строительство.* – 2019. – №. 9. – С. 45-50.
8. *Alekseytsev A. V.* Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // *Magazine of Civil Engineering.* – 2021. – №. 3 (103). – С. 10306.
9. *Федорова Н. В., Кореньков П. А.* Статико-динамическое деформирование монолитных железобетонных каркасов зданий в предельных и запределных состояниях // *Строительство и реконструкция.* – 2016. – №. 6. – С. 90-100.
10. *Peng Z. et al.* Experimental study of dynamic progressive collapse in flat-plate buildings subjected to an interior column removal // *Journal of Structural Engineering.* – 2018. – Т. 144. – №. 8. – С. 04018094.

# МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЛИТЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ УДАРЕ

С.Ю. Савин<sup>1</sup>, В.И. Колчунов<sup>2</sup>, М.З. Шарипов<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>suwin@yandex.ru

<sup>2</sup>asiorel@mail.ru

<sup>1</sup>manonkhoja.sh@bk.ru

## Аннотация

Анализ аварий и результатов экспериментальных исследований показывает, что перераспределение силовых потоков, происходящее при внезапном отказе одной из конструкций, может сопровождаться динамическим догружением сжатых несущих элементов конструктивной системы. В связи с этим при расчете железобетонных конструктивных систем зданий и сооружений на такие воздействия целесообразно учитывать параметры динамической прочности и деформативности бетона и арматуры. На основании анализа существующих моделей длительного и динамического силового сопротивления бетона предложен вариант деформационной модели динамического сопротивления бетона длительно нагруженных сжатых железобетонных элементов. Для моделирования поведения длительно нагруженного сжатого бетона при динамическом догружении используется вязкоупругая модель наследственного старения. Для обоснования и уточнения параметров предложенной деформационной модели разработана методика экспериментального исследования.

## ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия существенно расширился перечень нагрузок и воздействий, учитываемых при проектировании вновь возводимых зданий и сооружений, а также при реконструкции уже существующих объектов капитального строительства. В частности, к таковым относятся воздействия, вызванные внезапным отказом отдельных элементов несущих систем зданий и сооружений вследствие накопления силовых и средовых повреждений [1–5]. Как показывает анализ аварий и результатов экспериментальных исследований, перераспределение силовых потоков, происходящее при внезапном отказе одной из конструкций, может сопровождаться динамическим догружением сжатых несущих элементов конструктивной системы. В связи с этим целесообразно учитывать параметры динамической прочности и деформативности бетона и арматуры.

Анализ научной литературы [6–10] показывает, что значительная часть выполненных к настоящему времени исследований динамической прочности и деформативности сжатых бетонных и железобетонных элементов производилась без учета влияния факторов длительного силового сопротивления. При этом следует отметить, что в бетоне эксплуатируемых железобетонных конструкций во времени протекают два разнонаправленных процесса: нарастание жесткости с течением времени (старение) и рост деформаций в нагруженном бетоне при постоянных напряжениях (ползучесть). Однако в научной литературе практически отсутствуют результаты исследования прочности и деформативности сжатых железобетонных элементов длительно эксплуатируемых несущих систем при их динамическом догружении. В связи с этим актуальной проблемой является разработка и совершенствование моделей деформирования сжатых железобетонных элементов при таких режимах нагружения.

Целью данной работы являлась разработка методики экспериментального исследования влияния длительного нагружения на прочность и деформативность сжатых железобетонных стержневых элементов при динамическом догружении.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для возможности выполнения аналитического исследования в качестве первого приближения ограничимся линейными моделями длительного силового сопротивления бетона (1):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau}^t \sigma(t) \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (1)$$

Среди линейных моделей длительного силового сопротивления одними из наиболее совершенных являются вязкоупругие модели наследственного старения, для которых мера ползучести (вязкости) имеет вид (2):

$$C(t, \tau) = C[1 - e^{-\alpha(t-\tau)}] + B(e^{-\gamma\tau} - e^{-\gamma t}), \quad (2)$$

где  $C$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  – эмпирически устанавливаемые параметры модели,  $t$  и  $\tau$  – текущее время и время начала наблюдения.

При описании динамического сопротивления бетона, как правило, используется модель Ишлинского или ее модифицированные варианты. Для практических расчетов может быть использована модель Кельвина-Фойгта, исследованная Г.А. Гениевым [8]. Основные уравнения этой модели в безразмерном виде для случая динамического догружения элемента с начальными напряжениями от статически приложенной нагрузки (без учета ползучести) имеют вид [11] (3):

$$\frac{d\gamma_2}{d\xi} + (1 - \gamma_1)\gamma_2 - \frac{1}{2}\gamma_2^2 = \frac{1}{2}\varphi + \frac{1}{2}\gamma_1^2 - \gamma_1. \quad (3)$$

где  $\gamma_1$  - деформации условно статического этапа нагружения,  $\gamma_2$  - деформации при динамическом догружении бетона,  $\varphi$  - безразмерные напряжения

Уместно заметить, что эта модель динамического силового сопротивления не учитывает деформации, вызванные длительным нагружением, предшествующим динамическому воздействию. С другой стороны - параметры ВУМНС были получены при постоянных напряжениях, создаваемых в пружинных испытательных установках.

В связи с этим для моделирования поведения длительно нагруженного сжатого бетона при динамическом догружении используется вязкоупругая модель наследственного старения (ВУМНС), в которой элемент 1 моделирует длительное деформирование бетона, 2 – деформирование при динамическом нагружении. При этом полное время нагружения разбивается на два интервала, в пределах каждого из которых производные по времени функций напряжений и деформаций не меняют своего знака, т.е. являются монотонными. Выбор ВУМНС обусловлен старением материала, что оказывает влияние не только на длительное деформирование, но и на поведение бетона при его динамическом догружении (рис. 1).

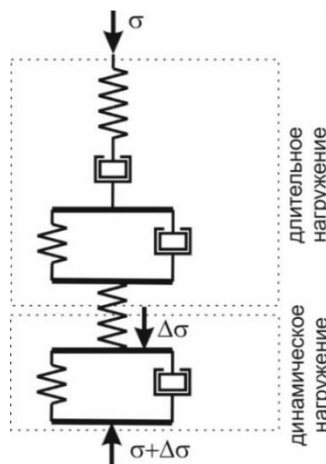


Рис. 1. Модель деформирования при режимном нагружении

Основное уравнение модели деформирования примет вид (4):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} - \int_{\tau}^{t_1} \sigma_1(t) \frac{\partial C_1(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau - \int_{t_1}^t \sigma_2(t) \frac{\partial C_2(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \quad (4)$$

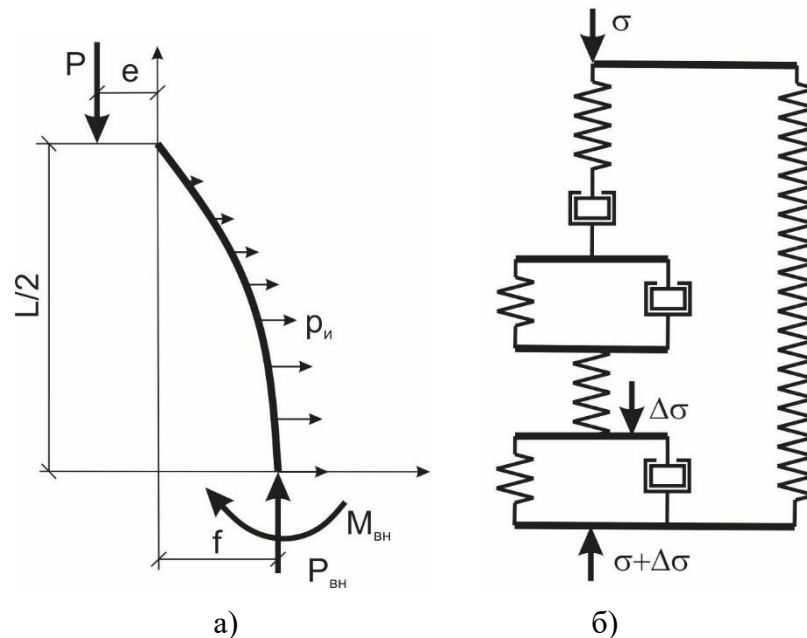
Меру вязкости вязкоупругого элемента динамического сопротивления в (4) будем искать в виде (5):

$$C_2(t, \tau) = C_2 [1 - e^{-\alpha_2(t-\tau)}] + B_2(e^{-\gamma_2\tau} - e^{-\gamma_2t}), \quad (5)$$

где  $C_2$ ,  $B_2$ ,  $\alpha_2$ ,  $\gamma_2$  – эмпирически устанавливаемые параметры модели,  $t$  и  $\tau$  – текущее время и время начала наблюдения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для аналитического исследования деформирования длительно нагруженных сжатых железобетонных элементов при их динамическом нагружении предполагается использовать следующую модель деформирования, дополненную параллельно присоединенным упругим армирующим элементом (рис. 2).



**Рис. 2.** Модель сжатого длительно нагруженного железобетонного элемента при динамическом догружении: а) расчетная модель внецентренно сжатого элемента, б) модель деформирования при режимном нагружении

Уравнение равновесия железобетонного элемента в общем виде (6):

$$P(t)(e + f) - M_u - M_{bn} = 0 \quad (6)$$

где  $M_u$  – момент от поперечных сил инерции,  $M_{bn}$  – момент внутренних усилий.

В качестве критерия исчерпания несущей способности будем рассматривать достижение нулевой отпорности элемента, выражающееся условием (7):

$$\frac{dP}{df} = 0. \quad (7)$$

В связи с этим планируется проведение экспериментального исследования несущей способности длительно нагруженных сжатых железобетонных элементов при динамическом ударе. Методика экспериментального исследования включает два этапа. На первом этапе предполагается испытание стандартных бетонных призм размерами 70x70x280 мм (рис. 3), выдерживаемых при постоянном уровне напряжений  $0.6R_{bn}$  в

течение не менее чем 182 дней, с последующим доведением их до разрушения без предварительной разгрузки при трех режимах нагружения: однократном квазистатическом, однократном динамическом за время не более 0,1 с (на гидравлическом прессе), однократном динамическом за время 0,01...0,05 с (на копровой установке). По результатам первого этапа испытаний предполагается уточнение параметров модели силового сопротивления бетона при рассматриваемом режимном нагружении.



**Рис. 3.** Изготовление образцов призм для проведения испытаний по предлагаемой методике

На втором этапе с целью верификации и уточнения полученных зависимостей будет выполнено испытание сжатых железобетонных стержневых конструкций размерами 100x100x800 мм на однократное динамическое воздействие с учетом предварительного длительного нагружения.

## **ВЫВОДЫ**

На основании анализа существующих моделей длительного и динамического силового сопротивления бетона предложен вариант деформационной модели динамического сопротивления бетона длительно нагруженных сжатых железобетонных элементов

Для обоснования и уточнения параметров предложенной деформационной модели разработана методика экспериментального исследования.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Wang H. et al. A Review on Progressive Collapse of Building Structures // The Open Civil Engineering Journal. 2014. Vol. 8, № 1. P. 183–192.
2. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // Case Studies in Construction Materials. 2019. Vol. 11.
3. Fedorova N.V., Savin S.Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // Building and reconstruction. 2021. Vol. 95, № 3. P. 76–108.
4. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Eng Struct. Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
5. Adam J.M. et al. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Eng Struct. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 210. P. 110414.
6. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. Москва: Стройиздат, 1970. 271 с.
7. Белов Н.Н. и др. Математическое моделирование процессов динамического разрушения бетона // Механика твердого тела. 2008. № 2. С. 124–133.
8. Гениев Г.А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. P. 18–19.
9. Цветков К.А., Баженова А.В., Безгодов И.М. Проблема построения диаграммы деформирования бетона при однократном динамическом воздействии с учетом влияния предварительных напряжений от действия статической нагрузки // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 152–158.

10. *Гениев Г.А.* О динамических эффектах в стержневых системах из физических нелинейных хрупких материалов // *Промышленное и гражданское строительство.* 1999. № 9. Р. 23–24.
11. *Савин С.Ю., Медянкин М.Д., Шарипов М.З.* Деформирование фибробетона при однократном динамическом воздействии с учетом влияния начальных напряжений от статической нагрузки // *Строительство и реконструкция.* 2022. №1. С. 76-88.

# ПОДБОР ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОСТЕКЛЕНИЯ ДЛЯ ЗДАНИЯ ТОРГОВОГО ЦЕНТРА В ГОРОДЕ ЧИТЕ

Е.В. Коркина<sup>1</sup>, С.С. Кучеров<sup>2</sup>, Е.В. Горбаренко<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1,3</sup>ФГБУ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, 127238, Москва, Локомотивный пр., д. 21,

<sup>3</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,

<sup>1</sup>*elena.v.korkina@gmail.com*

## Аннотация

При проведении расчетов по расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, необходимо рассчитывать значения солнечной радиации, поступающей на фасады здания. В нормативной документации методика таких расчетов приведена без учета ясных дней и влияния окружающей застройки. Результаты расчетов по действующей методике не в полной мере отражают действительные значения солнечной радиации, поступающей на фасады. Актуальным является расчет солнечной радиации по методу, учитывающему ясные дни и влияние окружающей застройки на поступление прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации.

В части светопрозрачных ограждающих конструкций, существует ряд критериев по подбору стеклопакетов с целью энергосбережения. В данной работе рассматривается выбор энергосберегающих стеклопакетов в солнечном климате г. Читы с длительным отопительным периодом, сравнивается эффективность применения различных стеклопакетов с помощью критерия подбора энергосберегающего остекления.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире необходимым условием сохранения жизни и развития цивилизации стало обеспечение человечества достаточным количеством тепловой энергии. Избыточное потребление тепловой энергии приводит к перерасходу невозобновляемых ископаемых ресурсов. Потребление энергоресурсов можно сократить за счет энергосбережения в крупных городских центрах. Одним из путей экономии тепловой энергии, требующейся для отопления и вентиляции здания, является проектирование тепловой защиты здания с учетом нагрева помещений от проникающей солнечной радиации [1, 2].

В отечественных нормативных документах расчет проникающей солнечной радиации производится для одиночного здания [2]. Метод расчета заключается в суммировании прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации за каждый месяц отопительного периода при средних условиях облачности. В условиях же городской застройки необходимо учитывать влияние противостоящих зданий на поступление солнечной радиации к исследуемому зданию [3]. Также в последние годы имеется тенденция к увеличению доли прямой радиации, что рассмотрено в работах [4-7], поэтому при расчете важен учет ясных дней, когда имеется большая доля прямой солнечной радиации.

В данной работе рассматривается подбор энергосберегающего остекления на основе выкладок работ [3, 8]. Исследуемое здание расположено в городе Чите, в котором наблюдается значительное количество солнечных дней за отопительный период, в качестве фактора застройки рассматривается учет влияния противостоящего здания.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Как показано в работах [3, 8], для фасадов здания можно записать значение критерия для подбора энергосберегающего остекления:

$$M = \frac{\sum_{j=1}^{j=J} 0,0864 \cdot ГСОП \cdot \sum_{l=1}^{L_j} A_{jl} \cdot \left( \frac{1}{R_{\delta njl}^{np}} - \frac{1}{R_{\delta njl}^{ep}} \right)}{\sum_{j=1}^{j=J} I_j^{sep} \cdot \sum_{l=1}^{L_j} \tau_{2jl} \cdot A_{jl} \cdot (g_{\delta njl} - g_{\delta njl})}, \quad (6)$$

где  $j$  – номер фасада;  $J$  – количество фасадов;

$L_j$  – количество окон на  $j$ -ом фасаде, шт.;

$I_j^{sep}$  – суммарная солнечная радиация, поступающая на  $j$ -тый фасад за отопительный период с учётом ясных и облачных дней, МДж/год·м<sup>2</sup>;

$ГСОП$  – градусо-сутки отопительного периода, °С·сут/год;

$A_{jl}$  – площадь  $l$ -го окна на  $j$ -том фасаде, м<sup>2</sup>;

$\tau_{2jl}$  – коэффициент, учитывающий затенение светового проема  $l$ -го окна на  $j$ -том фасаде непрозрачными элементами заполнения, доли ед., рассчитывается согласно [2];

$g_{jl}$  – коэффициент общего пропускания солнечной энергии стеклопакетом (без покрытий (индекс «бп») и с энергосберегающими покрытиями (индекс «эп»), соответственно), установленным в  $n$ -е окно на  $j$ -том фасаде, определяется согласно [2];

$R_{\delta njl}^{np}$ ,  $R_{\delta njl}^{ep}$  – приведенное сопротивление теплопередаче оконного блока со стеклами без покрытий (индекс «бп») и с энергосберегающими покрытиями (индекс «эп»), м<sup>2</sup>·°С/Вт, рассчитывается согласно [2].

Применение энергосберегающего остекления считается оправданным при выполнении условия [3]:

$$M > 1 \quad (2)$$

Чем выше значение критерия  $M$ , тем выгоднее применение заданного остекления в данном климате.

В методике [2] расчёт суммарной солнечной радиации,  $I_j^{sep}$ , проводится для облачных дней и для одиночно стоящего здания. При другом, уточняющем подходе расчёта солнечной радиации, будет изменяться её значение, следовательно, как видно из формулы (1), будет изменяться значение критерия  $M$ . В данной работе значение прямой солнечной радиации рассчитывается с учётом ясных дней [9], а также при наличии противостоящего здания.

Рассматривается здание торгового центра высотой 15 метров и шириной 60 метров. Напротив северного фасада исследуемого здания предполагается последовательное расположение противостоящего здания на расстоянии 30 метров. Противостоящее здание имеет стеклянный фасад с солнцезащитным остеклением со средневзвешенным альбедо 50 %. Исследуемое здание имеет заполнения светопроемов в виде оконных блоков (общая площадь по фасадам: северный - 16,7 м<sup>2</sup>, восточный - 7,5 м<sup>2</sup>, южный - 76,3 м<sup>2</sup>, западный - 7,2 м<sup>2</sup>), а также стеклянный фасад (общая площадь по фасадам: северный - 418,3 м<sup>2</sup>, восточный - 144,2 м<sup>2</sup>, южный - 135,2 м<sup>2</sup>, западный 164,3 м<sup>2</sup>). Здания расположены в г. Чите (52° с.ш.). Город принадлежит к числу самых солнечных городов России. По этому показателю Чита примерно соответствует южным городам, таким как Анапа или Находка. Однако, зима в Чите продолжительная и холодная: отопительный период продолжается около 8 месяцев,  $ГСОП$  равен 6949,6 °С·сут/год.

Расчёт суммарной солнечной радиации к исследуемому зданию с учётом ясных дней и при наличии противостоящего здания,  $\hat{I}_j^{sep}$ , производится согласно методам [3, 8, 9], с учётом облачных дней и при отсутствии противостоящего здания, т.е. при открытом горизонте,  $I_j^{sep}$ , согласно методике [2].

Рассматриваемое для подбора энергосберегающее остекление в оконных блоках и в стеклянном фасаде представлено в нескольких вариантах в таблицах 1 и 2, соответственно. Другие параметры формулы (1) приведены в таблицах 3-5. Расчет параметров светопроемов производится по [2].

Таблица 1. Стеклопакеты в оконных блоках: со стеклами без покрытий (БП) и с энергосберегающими покрытиями (ЭП)

№	Формула стеклопакета	Обозначение	g, доли ед.	$U_0$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
1	4М1-16-4М1-16- 4М1	БП	0,71	1,8
2	4СИ-16Ar-4М1-16Ar-4И	ЭП № 1	0,4	0,6
3	4И-16Ar-4М1-16Ar-4И	ЭП № 2	0,52	0,65
4	4К-16Ar-4М1-16Ar-4И	ЭП № 3	0,55	0,7

Таблица 2. Стеклопакеты в стеклянном фасаде: со стеклами без покрытий (БП) и с энергосберегающими покрытиями (ЭП)

№	Формула стеклопакета	Обозначение	g, доли ед.	$U_0$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
1	6М1-22-6М1-22-6М1	БП	0,63	1,7
2	6СИ-22Ar-6М1-22Ar-6И	ЭП № 1	0,38	0,5
3	6И-22Ar-6М1-22Ar-6И	ЭП № 2	0,5	0,55
4	6К-22Ar-6М1-22Ar-6И	ЭП № 3	0,52	0,6

Таблица 3. Характеристики заполнения светопроемов в виде оконных блоков

№	Обозначение светопроема	A, м <sup>2</sup>	$\tau_2$ , доли ед.	$R_{\delta n}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	$R_{эн \ №1}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	$R_{эн \ №2}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	$R_{эн \ №3}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт
1	Ок-1	0,7	0,61	0,47	1,4	1,34	1,28
2	Ок-2	1,8	0,73	0,5	1,48	1,4	1,33
3	Ок-3	2,5	0,69	0,49	1,45	1,38	1,31
4	Ок-4	3,6	0,76	0,51	1,5	1,41	1,34
5	Ок-5	10,6	0,77	0,5	1,51	1,41	1,34

Таблица 4. Характеристики заполнения светопроемов в виде витражей стеклянного фасада

№	Обозначение светопроема	A, м <sup>2</sup>	$\tau_2$ , доли ед.	$R_{\delta n}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	$R_{эн \ №1}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	$R_{эн \ №2}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт	$R_{эн \ №3}^{np}$ , (м <sup>2</sup> ·°С)/Вт
1	В-1	37,51	0,92	0,56	1,91	1,76	1,64
2	В-2	20,4	0,85	0,56	1,92	1,76	1,64
3	В-3	38,4	0,85	0,55	1,9	1,75	1,63
4	В-4	88,05	0,85	0,54	1,9	1,75	1,62
5	В-5	88,05	0,85	0,54	1,9	1,75	1,63
6	В-6	16,34	0,89	0,55	1,9	1,76	1,63
7	В-7	93,48	0,87	0,55	1,91	1,76	1,63
8	В-8	101,8	0,87	0,55	1,91	1,77	1,63
9	В-9	21,03	0,81	0,54	1,89	1,74	1,62
10	В-10	42,07	0,81	0,54	1,89	1,75	1,63
11	В-11	42,07	0,75	0,54	1,88	1,74	1,62

Таблица 5. Количество светопроемов на фасадах

№	Обозначение светопроема	Северный фасад	Восточный фасад	Южный фасад	Западный фасад
1	Ок-1	11	-	-	-
2	Ок-2	5	-	-	4
3	Ок-3	-	3	2	-
4	Ок-4	-	-	8	-
5	Ок-5	-	-	4	-
6	В-1	1/2	1/2	-	-
7	В-2	-	-	-	1
8	В-3	-	-	2	-
9	В-4	2	-	-	-
10	В-5	1	1	-	-
11	В-6	-	1	1	-
12	В-7	1	-	-	-
13	В-8	-	-	-	1
14	В-9	-	1	-	-
15	В-10	1	-	1	-
16	В-11	-	-	-	1

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 4 приведены результаты расчета суммарной солнечной радиации для фасадов исследуемого здания с учётом ясных дней и при наличии противостоящего здания [3, 8], и с учётом только облачных дней и при отсутствии противостоящего здания [2].

Таблица 4. Суммарная солнечная радиация, поступающая на вертикальную поверхность за отопительный период при наличии,  $\hat{I}_j^{sep}$ , и отсутствии,  $I_j^{sep}$ , противостоящего здания

Наименование	$\hat{I}_j^{sep}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$I_j^{sep}$ , МДж/м <sup>2</sup>	$\delta = \frac{\hat{I}_j^{sep} - I_j^{sep}}{I_j^{sep}} \cdot 100\%$
Северный фасад	3499	1298	169,5
Южный фасад	3598	2793	28,8
Западный фасад	2270	1473	54,1
Восточный фасад	2264	1472	53,8

В результате, при учёте влияния противостоящего здания, получены значения солнечной радиации, превосходящие таковые без учета противостоящего здания на 170 %, что в большой степени связано с количеством ясных дней в г. Чите и отражением солнечной радиации от фасада противостоящего здания с солнцезащитным остеклением. Повышенное значение солнечной радиации имеет влияние на проектирование и эксплуатацию систем отопления, вентиляции и кондиционирования. Нагрузка на систему отопления уменьшается, а на систему вентиляции и кондиционирования воздуха возрастает.

Далее приводятся значения критерия  $M$  для рассматриваемого торгового центра. Результаты расчета значений критерия приведены в таблице 5.



Таблица 5. Значения критерия *M*

Наименование остекления	Значение критерия <i>M</i>	
	При учёте ясных дней и противостоящего здания	При учёте только облачных дней и открытом горизонте
Сравнение БП с ЭП № 1	1,16	2,13
Сравнение БП с ЭП № 2	2,1	3,85
Сравнение БП с ЭП № 3	2,4	4,4

Из данных таблицы 5 следует, что значение критерия *M* чувствительно к изменению солнечной радиации: при увеличении значений солнечной радиации, поступающей на фасады при учете ясных дней и влиянии противостоящего здания, эффективность энергосберегающего остекления снизилась.

## ВЫВОДЫ

Влияние окружающей застройки необходимо учитывать при расчете солнечной радиации, поступающей на фасады здания, а также при выборе энергосберегающего остекления.

По сравнению с существующей методикой расчета тепlopоступлений от солнечной радиации, точность расчета по новому методу с учетом ясных дней и влиянием противостоящего здания выше, что в свою очередь будет способствовать более точному определению тепловой энергии, требующейся на отопление и вентиляцию здания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02 2003. М, 2012. 96 с.
2. СП 345.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты. М., 2017. 70 с.
3. Гагарин В.Г., Коркина Е.В., Тюленев М.Д. Влияние противостоящих зданий на энергосбережение здания с низкоэмиссионным остеклением. // Жилищное строительство. 2022. № 3. С. 30-35.
4. Горбаренко Е.В. Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 5-17.
5. Norris J.R., Wild M. Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar «dimming», and solar «brightening» // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. Iss. D 08. Doi:10.1029/2006JD007794.
6. Ohmura A. Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes // Journal of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. Iss. D 08. Doi:10.1029/2008JD011290.
7. Wild M. Global dimming- and brightening: A review. // Journal of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. Iss. D 10. Doi:10.1029/2008JD011470.
8. Гагарин В.Г., Коркина Е.В., Тюленев М.Д. Подбор низкоэмиссионного остекления с целью энергосбережения при наличии противостоящего здания // Сборник докладов Второй Национальной научной конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования». Москва. 2022. С. 120-127.
9. Коркина Е.В., Горбаренко Е.В., Гагарин В.Г., Шмаров И.А. Основные соотношения для расчета облучения солнечной радиацией стен отдельно стоящих зданий. // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 27-33.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛЬНОГО ШПУНТА, УСИЛЕННОГО ДВУТАВРОВОЙ БАЛКОЙ, ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ

И.А. Калугин<sup>1</sup>, А.М. Ибрагимов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>kalugin\_93@bk.ru

<sup>2</sup>igasu\_alex@mail.ru

## Аннотация

Обсуждается соединение шпунта с двутавром с помощью сварки для увеличения горизонтальной несущей способности. Соединение шпунта с двутавром проверяется при проведении экспериментального исследования на осевое растяжение. Фиксируются деформации при контрольной и максимальной нагрузках, а также напряжения в металле сварного шва и металле двутавровой балки.

## ВВЕДЕНИЕ

Шпунты зачастую необходимы при сооружении ограждений котлованов большой глубины различных зданий и сооружений. Среди основных областей использования шпунтов можно выделить: укрепление стен котлованов, защита котлованов от заполнения грунтовыми водами, обустройство кессонов, причалов, шлюзов, дамб, плотин и прочие, укрепление стен тоннелей, укрепление размываемых береговых линий [1].

В некоторых ситуациях не хватает несущей способности даже тяжелых шпунтов типа Л4 и Л5. Связано это может быть с различными причинами, но все их объединяет то, что недостаточной оказывается изгибная прочность шпунта. Существуют различные выходы из данной ситуации, но почти все они значительно увеличивают стоимость возведения ограждения [2]. Альтернативой вышеперечисленным мероприятиям может быть усиления шпунта, то есть повышение его несущей способности.

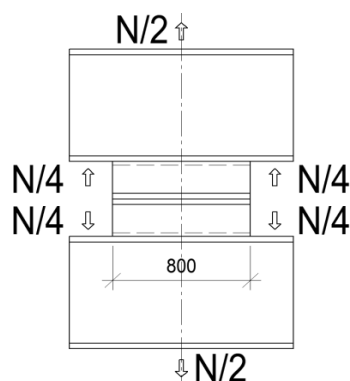
Одним из методов усиления является соединение шпунта с двутавром с помощью сварных швов [3]. Выбор двутавра объясняется тем, что он является наиболее эффективным видом сечения, работающего на изгиб. Взаимное расположение шпунта и двутавра обеспечивает передачу давления от грунта в плоскость стенки двутавра.

В связи с тем, что шпунт и двутавровая балка соединяются с помощью сварного соединения, существует вероятность возникновения различных дефектов при сварке, а соответственно необходим контроль сварных швов, а также неразрушающий контроль уже готового шпунта, усиленного двутавром [4].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

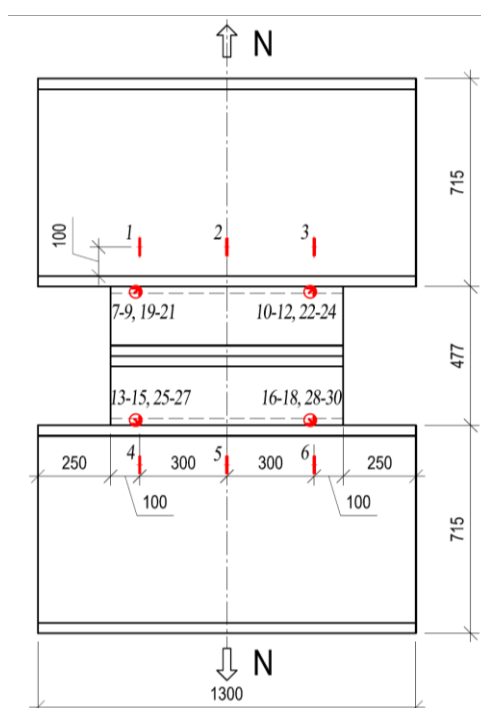
В рамках испытания шпунта, усиленного двутавром, были проведены: визуальный и измерительный контроль сварных швов, капиллярный контроль, лабораторное испытание физико-механических характеристик шва, экспериментальное исследование образцов на растяжение. Далее рассматриваются натурные испытания шпунта на осевое растяжение.

Нагружение образца выполняли 4 гидравлическими цилиндрами, в соответствии со схемой приложения нагрузки в испытании на растяжение (Рис. 1).



**Рис. 1.** Схема испытания на растяжение

В процессе испытаний выполняли контроль деформаций с использованием тензорозеток, установленных на сварной шов, и отдельно установленных тензорезисторов согласно схеме установки регистрирующей аппаратуры (Рис. 2).



**Рис. 2.** Схема установки тензорезисторов (тензорозеток) при испытании

Полученные в ходе испытания данные по тензорезисторам (мкм/м) переводили в напряжения с использованием модуля упругости ( $E$ ) для стали, равного 206 ГПа. Напряжения в точке ( $\sigma_i$ ) определяли по формуле (1):

$$\sigma_i = \varepsilon_i \times E \quad (1)$$

Для тензорозеток, состоящих из 3 тензорезисторов, определяют главные деформации ( $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ) и деформации сдвига ( $\gamma_{xy}$ ). При этом величины главных и сдвиговых напряжений определяют по формулам (2) и (3) в соответствии с ГОСТ Р 52728-2007 [5]. Здесь коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) принимают равным для стали 0,3, а модуль сдвига ( $G$ ) – 79 ГПа.

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_{1,2} + \mu \cdot \varepsilon_{2,1}) \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} \times G \quad (3)$$

Дополнительно в процессе испытания фиксировали величину «раскрытия» стенок шпунта за счет контроля перемещений двутавровых балок друг относительно друга с использованием индикаторов.

На рисунке 3 представлен общий вид образца №1 и оснастки перед проведением испытания с двух ракурсов.



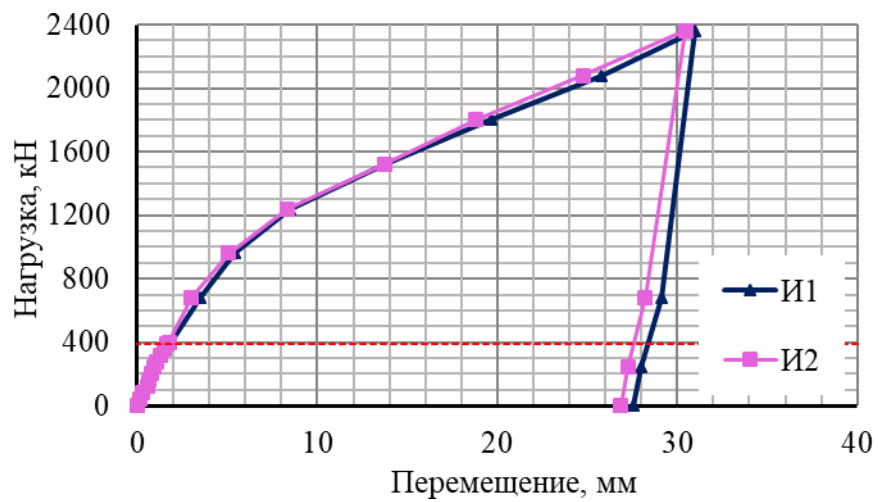
Рис. 3. Общий вид образца до проведения испытаний а) вид 1; б) вид 2

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительно перед испытаниями на осевое растяжение был проведен контроль сварных швов. При этом проводили визуальный и измерительный контроль сварных швов, капиллярный контроль и испытание контрольных образцов для определения характеристик сварного шва типа Н1. При проведении контроля было установлено, что обнаруженные дефекты не превышают допустимых значений, сварные соединения соответствуют ГОСТ 23118-2012[6], ГОСТ 14771-76 [7].

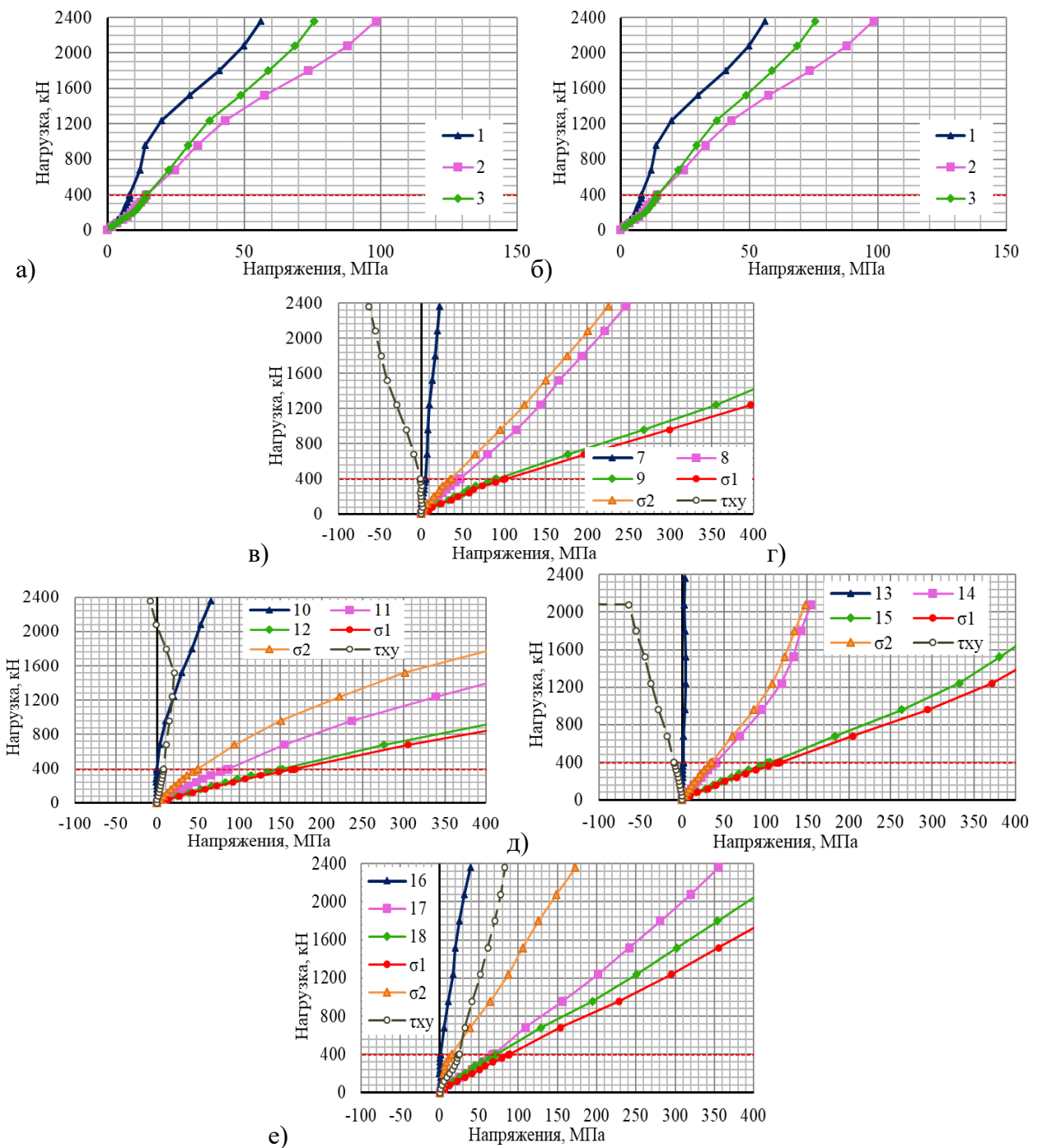
Выполнены натурные испытания серии из 3 образцов. В процессе испытаний удалось достичь максимальной суммарной нагрузки 2360 кН для каждого из образцов. При указанной величине нагрузки отказа образцов не произошло, но зафиксированы значительные деформации шпунтов, связанные со сближением стенок шпунта (рисунок 4). После снятия нагрузки остаточные деформации шпунтов составили около 28 мм, при их перемещении при максимальной нагрузке около 32 мм.

Величины изменения расстояния между балками в зависимости от величины внешней нагрузки представлены на рисунке 4. Красной горизонтальной линией на диаграмме отображена величина контрольной нагрузки, равная 392 кН.

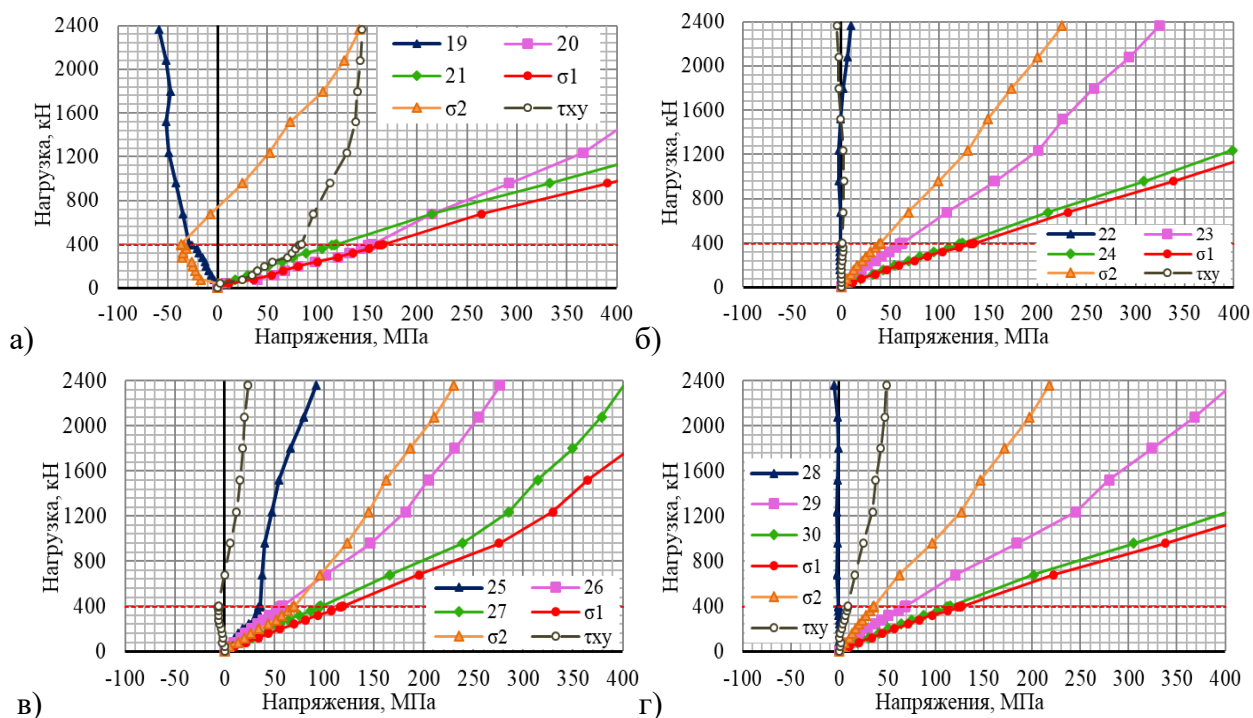


**Рис. 4.** Изменение расстояние между балками в зависимости от нагрузки

Результаты контроля деформаций по тензорезисторам в виде зависимостей изменения напряжений от суммарной нагрузки на образец показаны на рисунках 5, 6.



**Рис. 5.** Зависимость напряжений от величины нагрузки для а) тензорезисторов 1-3; б) тензорезисторов 4-6; в) тензорезисторов 7-9; г) тензорезисторов 10-12; д) тензорезисторов 13-15; е) тензорезисторов 16-18



**Рис. 6.** Зависимость напряжений от величины нагрузки для а) тензорозетки 19-21; б) тензорозетки 22- 24; в) тензорозетки 25-27; г) тензорозетки 28-30

Напряжения в сварных швах не превосходят величин 170 МПа при достижении контрольной нагрузки. Деформации не превышают 2 мм. При последующем увеличении нагрузки происходит значительное приращение перемещений между двутавровыми балками (рисунок 4) за счет перегиба стенок шпунтов. При этом в зоне расположения сварных швов Н1 происходит возникновение деформаций, значительно превосходящих предельные деформации упругости для стали (2000 мкм/м), поэтому многие тензорезисторы стали неработоспособными. Особенно это заметно при нагрузках выше 1520 кН.

## ВЫВОДЫ

Все исследуемые образцы обеспечивают восприятие расчетных нагрузок при осевом растяжении. Построены диаграммы «нагрузка-напряжение» по контрольным точкам (рисунки 5, 6). Установлено, что в сварных швах при достижении контрольной нагрузки не возникает напряжений, превосходящих предел пропорциональности металла сварного шва, равного около 400 Мпа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шипелев И.Л., Захарова Я.Ю., Кандыбко Я.И. Обоснование использования шпунта Ларсена из ПВХ взамен металлического аналога// Дальний восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Т.1, № 1. С. 191-194.
2. Нестеров А.С. Применение бездефектных технологий при устройстве ограждающих стен котлованов с использованием стального трубчатого шпунта// Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования. 2012. С. 319-323.
3. Пестряков Е.П. Экспериментальные исследования стальных двутавров на чистый при воздействии статической нагрузке// Научный альманах. 2017. № 3-3(29). С.180-183.
4. Папуша А.Г., Андреев А.Н. Анализ дефектов в сварных соединениях, выполненных электронно-лучевой сваркой// Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т.1, №13. С.424-426.
5. ГОСТ Р 52728-2007. Метод натурной тензотермометрии. Общие требования.
6. ГОСТ 23118-2012 Конструкции стальные строительные. Общие технические условия.
7. ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменениями N 1, 2, 3)



## ВЛИЯНИЕ МЕСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ НА РАБОТУ СТАЛЬНОГО ИЗГИБАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА

**В.В. Михаськин**

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4,  
mikhasvv81@rambler.ru*

### **Аннотация**

Приведен краткий обзор литературных источников по вопросу исследования влияния повреждений на работу стальных элементов строительных конструкций. С целью анализа изменения напряженно-деформированного состояния изгибаемого элемента выполнено численное моделирование шарнирно опертой двутавровой балки, нагруженной сосредоточенной нагрузкой, по двум расчетным схемам: с и без локального повреждения. Последнее представлено местной погибью в верхнем поясе, расположенной бисимметрично относительно обеих главных осей сечения. Форма погиби – синусоида, амплитудное значение 70 мм, длина вдоль кромки пояса 300 мм. В результате расчетов выявлено увеличение напряжений в областях, расположенных рядом с погибью и наоборот, уменьшение в периферийных зонах, удаленных от погиби. Отмечено увеличение вертикальных прогибов по всем сечениям вследствие уменьшения жесткости. Кроме того, обнаружено появление деформаций кручения, увеличивающих вероятность потери устойчивости изгибаемого элемента.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В процессе жизненного цикла строительные (что особенно важно несущие) конструкции зданий и сооружений зачастую получают различного рода повреждения (общие и местные погиби, вырезы, коррозионный износ и т. д.), неизбежно изменяющие их напряженно-деформированное состояние. Если говорить об этом применительно к стальным конструкциям, то их относительно легкая повреждаемость обусловлена тем, что подавляющее большинство таких элементов являются тонкостенными, и, соответственно, весьма чувствительными прежде всего к непроектным локальным воздействиям (например, внеузловое приложение нагрузки в ферменных конструкциях). К результатам подобного рода воздействий можно отнести, например, местные погиби полок прокатных и сварных двутавров (рисунок 1). При этом целостность элемента не нарушается, но изменяется форма сечения, что может привести к ослаблению сечения в области повреждения. Любое изменение исходного поперечного сечения неизбежно приводит к смещению центра тяжести и повороту главных осей, что провоцирует появление новых силовых факторов, которые не были учтены при проектировании и могут как разгружать, так и догружать элемент. Также вследствие изменения формы сечения уменьшается жесткость и увеличивается деформативность, при этом возможно появление новых перемещений, например, углов поворота относительно продольной оси из-за кручения.





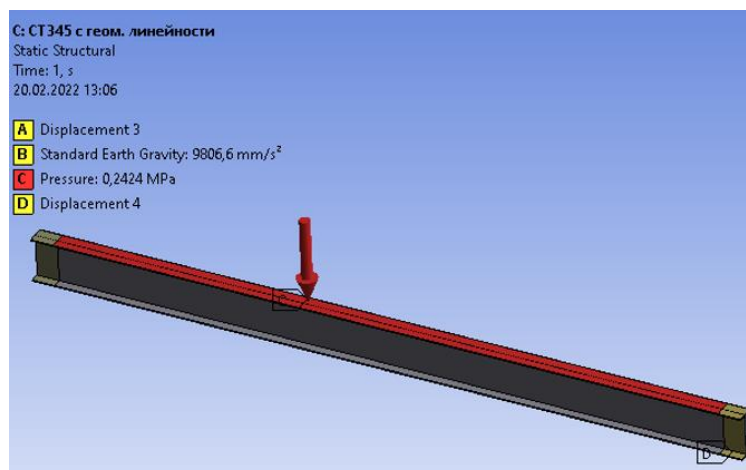
**Рис. 1.** Местная погибь полки двутавровой балки

По вопросу влияния повреждений на работу эксплуатируемых строительных конструкций существует ряд исследований, приведем здесь некоторые источники. Г.И. Белым предложена проверка прочности элементов стальных конструкций с местными повреждениями, суть которой заключается в замене ослабленного сечения на исходное неослабленное, но догруженное дополнительными силовыми факторами, компенсирующими отсутствие части сечения [1, 2]. Инженерная привлекательность данного метода состоит в том, что сохраняется нормативная форма проверки с введением дополнительных коэффициентов или корректировкой существующих. Рядом авторов исследовалось влияние общих и местных дефектов на работу элементов из уголков [3, 5, 7]. В [4] применительно к стержням из одиночных уголков сделан важный вывод о том, что местные повреждения могут как понижать, так в некоторых случаях и несколько повышать несущую способность, определяющим здесь является направление эксцентриситетов по отношению к месту расположения по сечению локальной погиби. Мункуевой Е.М. проанализировано влияние местных дефектов на прочность и устойчивость элементов крестового сечения из уголков, даны практические рекомендации по их учету [6]. Проектным институтом ЦНИИПроектстальконструкция разработаны рекомендации по учету влияния дефектов и повреждений на эксплуатационную пригодность стальных конструкций производственных зданий [9]. В частности, выполнена корректировка общеизвестных формул по расчету прочности, устойчивости с введением дополнительных коэффициентов, учитывающих влияние дефектов (коррозионное повреждение, общее искривление стержневого элемента, наличие расцентровки в узлах ферм). В составе пособия по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*) также приведены канонические формулы проверки прочности и устойчивости, позволяющие учесть влияние общих (погибей) и местных (погибей и вырезов) повреждений [8].

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В данной работе влияние местного повреждения на напряженно-деформированное состояние изгибаемого элемента будем рассматривать на примере однопролетной шарнирно опертой балки с локальной погибью.

Балка двутаврового профиля сечением 40Б1 по ГОСТ Р 57837-2017 длиной 6 м (рисунок 2). Класс стали С345. Загружение предполагалось в виде сосредоточенной нагрузки по верхнему поясу величиной 5 т, точка приложения на расстоянии 2,5 м от левой опоры.



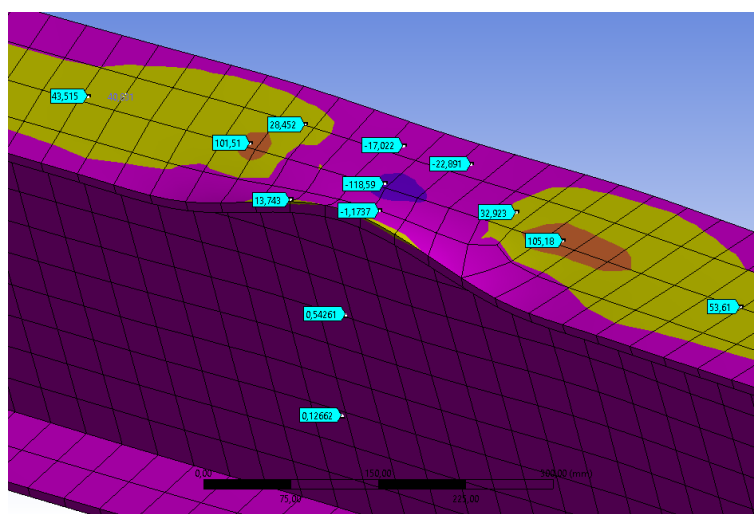
**Рис. 2.** Расчетная схема балки

Локальная погибь (рисунок 3) расположена в верхнем поясе в середине пролета балки несимметрично относительно обеих главных осей. Форма погиби – синусоида, амплитудное значение 70 мм, длина вдоль кромки пояса 300 мм.

Для возможности анализа изменения напряженно-деформированного состояния построены две расчетные схемы: без и с погибью.

Численное моделирование выполнено в программном комплексе Ansys с учетом физической нелинейности материала (задана билинейная модель с изотропным упрочнением).

Поскольку в данном исследовании была поставлена задача оценить изменение прочности и деформативности в плоскости приложения нагрузки, то устойчивость считалась обеспеченной (балка считалась раскрепленной из плоскости).



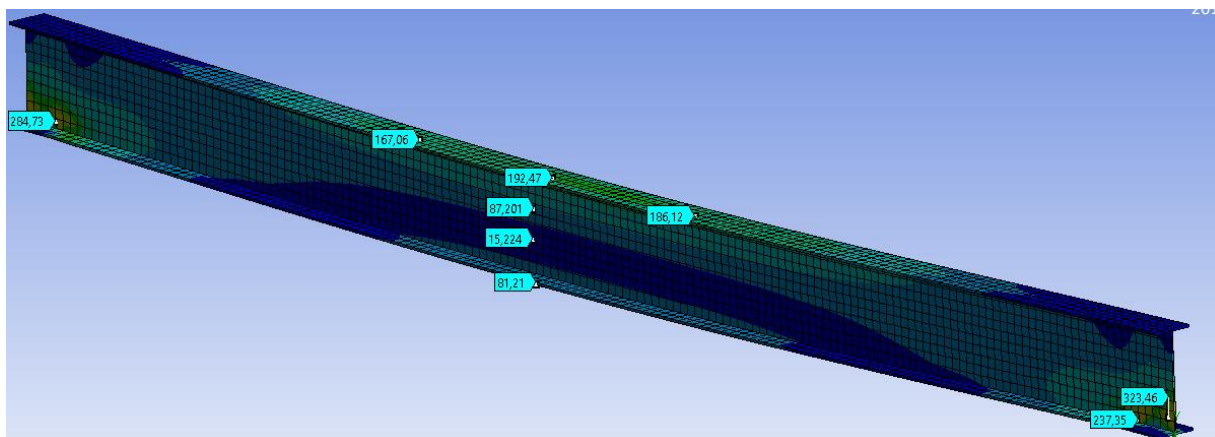
**Рис. 3.** Общий вид локальной погиби

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

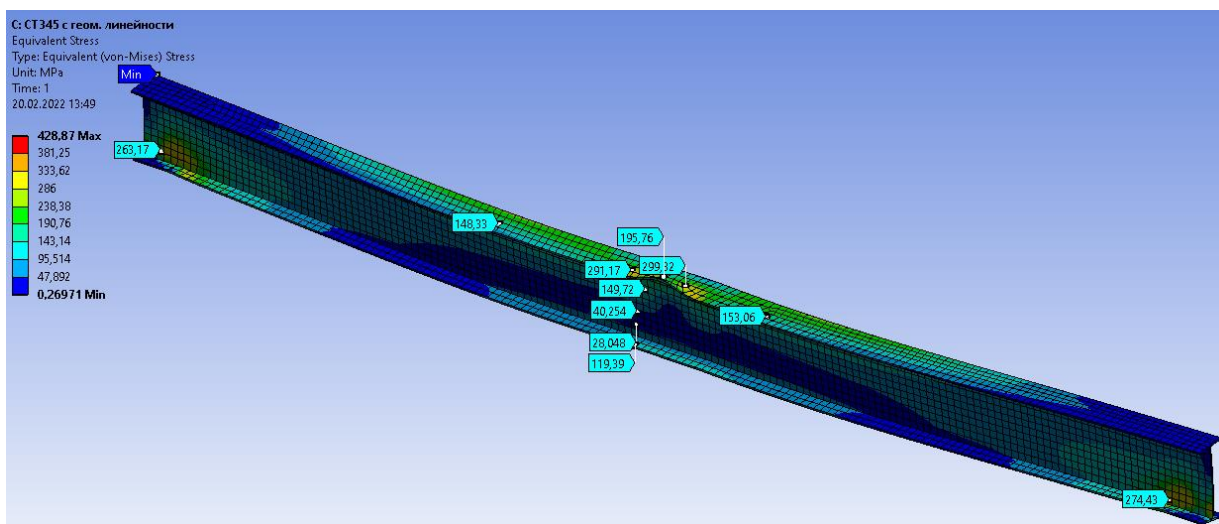
По результатам анализа поведения под нагрузкой обеих расчетных моделей можно отметить изменение их напряженно-деформированного состояния (рисунки 4, 5).

В зоне расположения погиби (по ее центру) произошло увеличение эквивалентных напряжений на 35% (без погиби 192 мПа, с погибью 291 мПа). В свою очередь при удалении от сечения с погибью разность между напряжениями по двум моделям уменьшается, причем в обратную сторону. На удалении 1 м напряжения уменьшились на 12% (без погиби 167 мПа, с погибью 148 мПа). В приопорных зонах также отмечено снижение напряжений на 8% (без погиби 284 мПа, с погибью 263 мПа). Здесь нужно отметить, что при изменении жесткости элемента (ее уменьшении в ослабленном сечении)

неизбежно происходит перераспределение усилий по длине элемента и соответственное изменение напряжений, с периферийных зон последние частично перетекают в область ослабления, что объясняет выявленную закономерность.



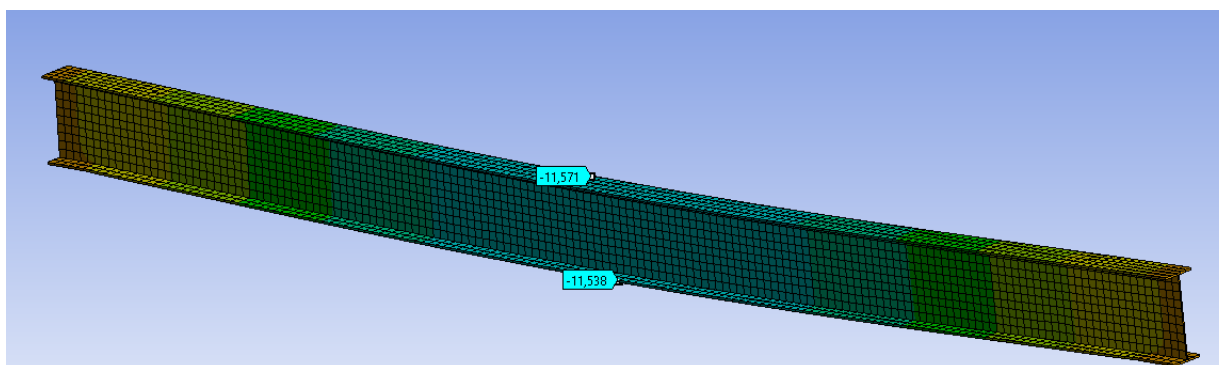
**Рис. 4.** Напряжения в характерных сечениях балки при отсутствии местной погиби



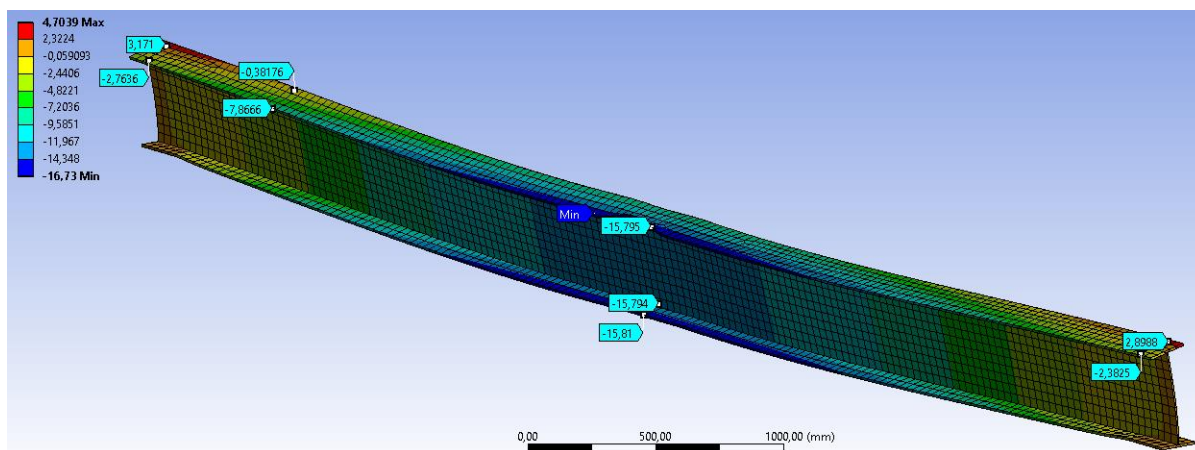
**Рис. 5.** Напряжения в характерных сечениях балки при наличии местной погиби

Проанализировано также изменение деформативности путем сопоставления вертикальных прогибов в сечении с погибью по двум расчетным моделям (рисунки 6, 7).

Отмечено увеличение деформативности – максимальное изменение прогиба на 26% (без погиби 11 мм, с погибью 15 мм). Поскольку эксплуатируемые конструкции зачастую имеют прогибы, близкие к предельным, такое увеличение может привести к наступлению второго предельного состояния. Повышенная деформативность может сказаться и на работоспособности, например, установленного оборудования, прежде всего динамического характера работы.

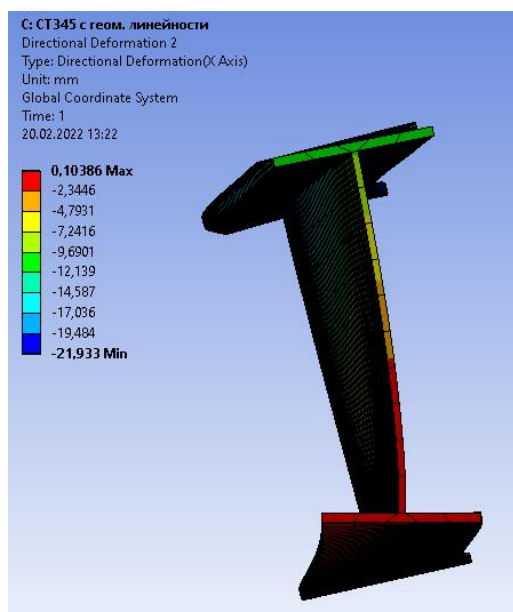


**Рис. 6.** Максимальный прогиб в середине балки при отсутствии местной погиби



**Рис. 7.** Максимальный прогиб в середине балки при наличии местной погиби

Бисимметричность погиби вызвала нарушение симметрии продольных силовых линий с их некоторым сгущением в области дефекта, что спровоцировало появление деформаций кручения. На рисунке 8 показано поперечное сечение вблизи сечения с погибью. Хорошо заметны деформации из плоскости, при этом максимальное отклонение сечения (по верхнему поясу) составило 10 мм, что сопоставимо с вертикальным прогибом без погиби (11 мм). Подобного рода сечения (балочные двутавры) имеют довольно небольшую жесткость на кручение, поэтому такого рода влияние может быть весьма чувствительным и увеличивать вероятность потери устойчивости.



**Рис. 8.** Деформации закручивания сечения

## ВЫВОДЫ

В работе проанализировано влияние местного повреждения (локальной погиби) на напряженно-деформированное состояние изгибаемого элемента (балки из шарнирно опертого прокатного двутавра 40Б1 длиной 6 м), находящегося под эксплуатационной нагрузкой (сосредоточенная сила 5 т).

Выявлено, что:

- в зоне локальной погиби наблюдается увеличение напряжений до 35%,
- в периферийных относительно погиби сечениях выявлено небольшое снижение напряжений от 8 до 12%,
- увеличилась деформативность (вертикальные прогибы), максимальное повышение в середине пролета на 26%,
- вследствие бисимметричности повреждения появились деформации кручения.

Таким образом, наличие местного дефекта существенно изменяет напряженно-деформированное состояние изгибаемого элемента и должно учитываться при проведении проверочных расчетов эксплуатируемых конструкций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Белый Г.И.* Проверка прочности стальных стержней, имеющих несимметричные ослабления сечений // Металлические конструкции и испытания сооружений. – Л., 1987. – С. 9-12.
2. *Белый Г.И., Сотников Н.Г.* Устойчивость стержней эксплуатируемых стальных ферм с учетом влияния общих и местных дефектов и повреждений // Реконструкция промышленных зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1988. – С. 49-53.
3. *Корчак М.Д.* О влиянии местных начальных искривлений пояса на устойчивость решетчатого стержня // Совершенствование развития норм проектирования стальных строительных конструкций. – М., 1981. – С. 119-127.
4. *Лакусса Казимир Симплис Эдо.* Прочность и пространственная устойчивость стержней из одиночных уголков, имеющих общие и местные дефекты и повреждения. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург., 1993. – 25 с.
5. *Любимов Н.М., Чернышев Н.Т.* Влияние малых искривлений растянутых стержней на работу сварных ферм // Промышленное строительство. – 1968. – №3. – С. 31-32.
6. *Мункуева Е.М.* Прочность и устойчивость элементов стальных конструкций крестового сечения, имеющих общие и местные дефекты и повреждения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург., 1999. – 18 с.
7. *Опланчук А.А.* Несущая способность стержней ферм из уголков с местными дефектами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск., 1983. – 19 с.
8. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). – Стройиздат. – М., 1989. – 160 с.
9. Рекомендации по учету влияния дефектов и повреждений на эксплуатационную пригодность стальных конструкций производственных зданий. – ЦНИИПроектстальконструкция, – М., – 1987. – 46 с.

# НАДЕЖНОСТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

А.Г. Тамразян<sup>1</sup>, Т.А. Мацевич<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>*tamrazian@mail.ru*

<sup>2</sup>*matseevichta@mgsu.ru*

## Аннотация

Строительные системы подвержены естественным неопределенностям из-за изменчивости многих, трудно поддающихся контролю, так называемых «факторов шума», которые включают, помимо прочего, внешние нагрузки, свойства материалов и качество строительных работ. Анализ надежности традиционных подходов на предмет неопределенности в процессе проектирования конструкций имеет два недостатка.

Во-первых, конструкция может не удовлетворять требованиям безопасности, если фактические неопределенности в «факторах шума» недооцениваются. Таким образом, требования безопасности могут быть нарушены из-за высокой вариации реакции системы из-за «шумовых факторов».

Во-вторых, чтобы гарантировать безопасность при наличии такой высокой вариативности реакции системы, необходимо выбрать излишне консервативный, неэффективный и, таким образом, дорогостоящий проект.

Когда при таких неопределенностях надежность не рассматривается в качестве одной из целей проектирования, компромисс между чрезмерной конструкцией для обеспечения безопасности и недостаточной конструкцией для экономии средств усугубляется.

## ВВЕДЕНИЕ

Гражданская инфраструктура в России приближается к расчетному сроку службы или уже прошла его. Это предоставляет возможность проектировщикам внедрить методы онлайн-мониторинга и разработать новые схемы упреждающего обслуживания и эксплуатации с использованием обновленных технологий, обеспечивающих устойчивость конструкции на протяжении всего срока службы [1]. В то время как при новом строительстве проектировщики могут использовать методы проектирования, которые повышают устойчивость от непредвиденных факторов. В данной статье будут рассмотрены обе эти возможности.

Основная цель работы инженера-конструктора заключается в систематическом принятии решений по выбору безопасной и экономически эффективной конструкции [2]. Эти цели сами по себе, конкурирующие в том, что самый безопасный проект, скорее всего, не является наиболее экономически эффективным. Эти заставляют проектировщиков искать и находить компромиссы, чтобы одновременно достичь как можно большего числа целей проектирования. Этот процесс еще больше усложняется, если учесть, что все эти решения принимаются в условиях неопределенности [3,4].

Жизненный цикл строительной системы страдает от неопределенности от начала проектирования до конца эксплуатации. Неопределенность проявляется во многих формах, некоторые из которых влекут за собой: (1) попытку предсказать будущее и предположить доверие расчетов в прошлом; (2) статистические пределы, в которых проектировщики используют отдельные образцы, примеры, чтобы предсказать поведение всей системы; (3) пределы адекватности модели, в которых конструктивная, аналитическая или численная модель, разработанная при проектировании и анализе, упрощает реальность, устраняя физику более высокого уровня в системе; (4) случайность, при которой конструкционные свойства меняются пространственно; (5) человеческие



ошибки, допущенные в процессе проектирования, изготовления и строительства, которые изменяют реальную конструкцию или анализ. В процессе проектирования необходимо учитывать присущую этим факторам изменчивость с тем, чтобы обеспечить достижение предлагаемых целей проектирования при любых представляющих интерес обстоятельствах.

Для учета изменчивости проектных параметров были разработаны два основных подхода. Первый, по допускаемым напряжениям (ДН), основан на детерминированном подходе к проектированию. Благодаря подходу (ДН) проектировщики не пытаются количественно определить различные источники неопределенности, а, скорее, применяют единый субъективный "коэффициент безопасности" для фиксации всей изменчивости нагрузок и сопротивления. Результатом обычно является консервативная и безопасная конструкция, которая, скорее всего, будет неэффективной и избыточной [5]. Второй подход, расчет по предельным состояниям через дифференцированные коэффициенты нагрузки и сопротивления (ПС), является формой расчета конструкции на основе надежности. Здесь неопределенности в процессе проектирования количественно разделены на две категории: номинальная несущая способность и коэффициенты надежности по нагрузке и сопротивлению материалов. Такое разделение позволяет прогнозировать свойства материала и допуски конструкции через номинальные несущие способности, а также предсказуемость временных нагрузок через эти коэффициенты. Хотя этот метод учитывает изменчивость и включает оценку рисков, успех подхода по (ПС) зависит от наличия и точности статистических данных [6,7]. В конструкциях, основанных на надежности, неопределенность моделируется как случайные переменные или процессы. Если имеется достаточное количество точных статистических данных и распределение каждой случайной переменной хорошо установлено, то неопределенности могут быть точно учтены при проектировании. Однако, если отсутствуют статистические данные и распределения параметров не до конца понятны, что приводит к плохой оценке, то сами случайные переменные вызывают неопределенности в процессе проектирования [6]. Поэтому требования безопасности могут быть нарушены из-за потенциально недооцененной изменчивости поведения конструкции.

Например, при проектировании железобетонного каркасного здания размеры колонн могут рассматриваться как конструктивные параметры; неопределенные свойства материала или нагрузочно-силовые функции могут рассматриваться как «шумовые факторы»; реакция конструкции, такие как напряжения, деформации и перемещения, могут рассматриваться как продукт процесса проектирования. Поскольку эти «шумовые факторы» представляют собой трудноуправляемые параметры, то невозможно их уменьшить или устранить каким-либо возможным способом. Цель принципов надежного проектирования должна заключаться в уменьшении воздействия этих «шумовых факторов» на реакцию конструкции.

Используя нелинейные взаимодействия между конструктивными параметрами и «шумовыми факторами», метод надежного проектирования стремится найти конструктивные параметры, обеспечивающие конструкцию, устойчивую к трудно поддающемуся контролю «шумовых факторов», тем самым уменьшая изменчивость реакции конструкции, и давая не только безопасные, но и экономически эффективные решения.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Целью надежного проектирования является управление контролируемыми конструктивными параметрами, т.е. теми параметрами, которыми проектировщик может манипулировать. Это тип материала или геометрические размеры, чтобы свести к минимуму последствия от «шумовых факторов», такие как строительные недоделки или изменчивость материалов, что делает процесс более надежным от «шума» при низких затратах. В этом процессе используется взаимодействие между конструктивными

параметрами и «шумовыми факторами», которые максимально снижают влияние «шума» на желаемый результат за счет уменьшения изменчивости и корректировки среднего значения до целевого [8]. Эта цель может быть достигнута несколькими путями: Байесовским методом [9], методами многокритериальной оптимизации, или через надежно- оптимизационную схему [10].

Рассмотрим двухэтапный метод надежностного проектирования (рис. 1). Первый шаг направлен на уменьшение разброса. На этом этапе осуществляется поиск оптимальных настроек проектных переменных путем максимизации соотношения «сигнал/шум» (С/Ш), определяемого как отношение отклика к изменению отклика, вызванному «шумовыми факторами». Определим три разных класса отношений (С/Ш). Первый –лучший, где желательно иметь определенное целевое значение. Второй -чем меньше это отношение, тем лучше, где наиболее надежным вариантом является отклик с нулевым значением, и третий класс - чем больше, тем лучше, который направлен на достижение целевого значения до предельного значения.

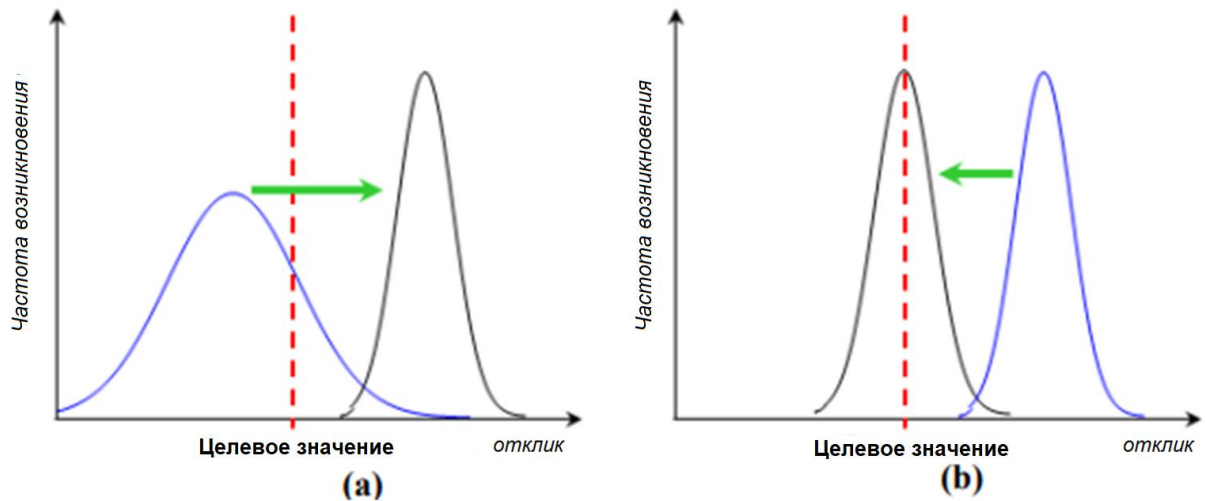
Уравнения (1-3) обобщают различные классификации отношений (С/Ш).

$$\lambda = \lg\left(\frac{\mu^2}{\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$\lambda = -\lg\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right] \quad (2)$$

$$\lambda = -\lg\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right] \quad (3)$$

где  $\mu$  –среднее значение отклика системы,  $\sigma$  – стандартное отклонение отклика из-за «шума»,  $y_i$  – значения наблюдаемых откликов.



**Рис. 1.** Двухэтапный метод надежностного проектирования; (а) сведение к минимуму вариативности, изменением параметров конструкции, (б) перемещение среднего значения распределения к цели за счет применения масштабного коэффициента

Второй шаг метода ориентирован на перемещении среднего значения к желаемой цели (рис. 1).

Это может быть достигнуто путем тщательного подбора параметров конструкции (s), которые влияют только на среднее значение распределения, и показывают отсутствие влияния при сохранении максимального соотношения «сигнал/шум», достигнутого на первом этапе. Этот проектный параметр (s) является масштабным коэффициентом и может быть рассчитан по формуле



$$s = \frac{m}{\mu} \quad (4)$$

где  $s$  - масштабный коэффициент,  $m$ - целевое значение (реакция),  $\mu$ -среднее значение текущего распределения.

Благодаря своей простоте и проверенным преимуществам, этот метод применяется в различных инженерных аспектах [11,12]. При адаптации принципов этого метода для других инженерных применений возникло несколько проблем, которые привели к последующим исследованиям и обновлению методов. Некоторые из этих проблем включают неспособность обнаружить масштабный коэффициент [13]; большие вычислительные мощности, необходимые для получения всех взаимодействий коэффициентов; неспособность метода включить ограничения при проектировании.

Существуют практические ситуации, когда все параметры существенно влияют как на среднее, так и на стандартное отклонение. В таких ситуациях двухэтапный метод не может быть применим, поскольку максимальное отношение «сигнал-шум» не поддерживается, что приводит к непреднамеренному случайному смещению стандартного отклонения на втором этапе. В этих случаях для получения проектных параметров могут использоваться методы оптимизации или методы с одновременным учетом среднего и стандартного отклонения отклика [14].

На первом этапе разработки надежностного проектирования необходимо определить конструктивные ограничения и параметры, «шумовые факторы» и диапазоны, в которых эти параметры могут меняться [15].

Реакциями системы, представляющей интерес, могут быть, например, сдвиг, перемещение конструкции под действием поперечной нагрузки, крен здания, прогибы, образование, раскрытие трещин, а также экономичность, долговечность, живучесть и т.п. Расчетные ограничения устанавливается равным пороговому, максимальному значению.

## **ВЫВОДЫ**

Надежностные методы проектирования могут быть использованы для формулировки расчетов строительных конструкций в процессе проектирования, которые нечувствительны к изменчивости «шумовых факторов», тем самым одновременно экономя стоимость и обеспечивая безопасность проекта.

Метод позволяет, используя современные мощности ЭВМ, учитывать одновременно несколько «шумовых факторов».

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект «Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз», номер проекта № FSWG-2020-0007).

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Тамразян А.Г. К задачам мониторинга риска зданий и сооружений. // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 3 (170). С. 19-21.
2. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Структура целевой функции при оптимизации железобетонных плит с учетом конструкционной безопасности. // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 14-15.
3. Tamrazyan A., Alekseytsev A. Assessment of Mechanical Safety of Cost-Optimized Reinforced Concrete Structures. // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 7. Сер. "VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2020". 2021. С. 012035.
4. Тамразян А.Г., Федорова Н.В., Дехтерев Д.С. Оценка весомости конструкционных параметров платформенного стыка панельных зданий на надежность соединения по методу линеаризации. Известия высших учебных заведений. // Технология текстильной промышленности 2018. № 1 (373). С. 155-161.

5. *Mohsine, A., Kharmanda, G., and El-Hami, A.* Improved hybrid method as a robust tool for reliability-based design optimization. // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2006. Vol. 32. No. 3. P. 203-213.
6. *Wang, Wei, Wu, Justin (Y.-T.) and Lust, Robert V.* Deterministic Design, Reliability Based Design and Robust Design. // *Project Report, Southwest Research Institute and General Motors Research and Development Center*.
7. *Тамразян А.Г.* Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений. // *Вестник МГСУ*. 2011. № 2-1. С. 21-27.
8. *Тамразян А.Г.* Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности. // *Вестник МГСУ*. 2012. № 10. С. 109-115.
9. *Vanik, M.W., Beck, J.L., and Au, S.K.* (2000), Bayesian Probabilistic Approach to Structural Health Monitoring. // *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.126, No.7, P. 738-745.
10. *Beyer, H. and Sendhoff, B.* Robust Optimization – A Comprehensive Survey, // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2007. Vol. 196. P. 3190-3218.
11. *Lee, M.C.W., Mikulik, Z., Kelly, D.W., Thomson, R.S., and Degenhardt, R.* Robust Design - A Concept for Imperfection Insensitive Composite Structures. // *Composite Structures*, 2010, No. 92, P. 1469-1477.
12. *Тамразян А.Г., Мацевевич Т.А.* Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой. // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
13. *Montgomery, D.C.* Design and Analysis of Experiments // *Wiley*, Singapore, 1991, P. 417-433.
14. *Kumar, A., Nair, P.B., Keane, A.J., Shahpar, S.* Robust Design Using Bayesian Monte Carlo. // *International Journal for Numerical Methods in engineering*, 2008, Vol. 73, P. 1497-1517.
15. *Тамразян А.Г., Дехтерев Д.С., Карпов А.Е., Ласковенко А.Г.* Определение расчетных параметров для оценки надежности платформенных стыков панельных зданий. В сборнике: *Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия*. // Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 413-416.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАКЛАДКАХ

М.А. Дежин<sup>1</sup>, А.М. Ибрагимов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>maksim1403@yandex.ru

<sup>2</sup>igasu\_alex@mail.ru

## Аннотация

Цель работы – экспериментальным способом определить особенности работы соединений деревянных элементов на алюминиевых накладках с использованием шурупов. В статье рассмотрены 4 разработанные конструкции образцов соединений цельнодеревянных элементов на алюминиевых накладках. Они позволяли проводить моделирование работы реальных соединений главных и второстепенной балок, а также ригелей и колонны. Проведены испытания образцов соединений, из четырех разработанных вариантов конструкций образцов выбран один, наиболее полно отражающий действительную работу реальных соединений деревянных элементов. Определены деформационные и прочностные характеристики соединений. На основании проведенных исследований определены особенности работы изучаемых соединений, осуществлена разработка образца соединения цельнодеревянного элемента с алюминиевой накладкой, который позволял проводить разработку мер, направленных на повышение несущей способности и снижение деформативности изучаемых соединений без значительных материальных затрат, связанных с покупкой дорогостоящих накладок SHERPA.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос обеспечения строительной отрасли в области деревянного домостроения эффективными способами соединения цельнодеревянных элементов, обладающими высокими показателями несущей способности, является важным [1,2,3]. На сегодня актуальны соединения на алюминиевых накладках SHERPA, которые после их крепления к деревянным элементам шурупами образуют жесткое соединение по типу «ласточкин хвост» [4,5,6,7]. Для изучения действительной работы соединений цельнодеревянных элементов на алюминиевых накладках разработаны конструкции образцов, отражающих действительную работу реальных соединений, которые представлены на рисунках 1–4.

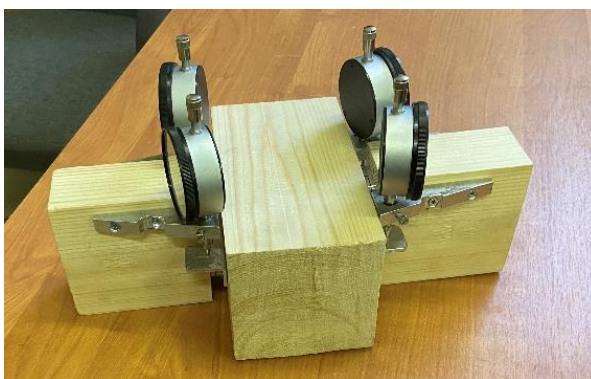
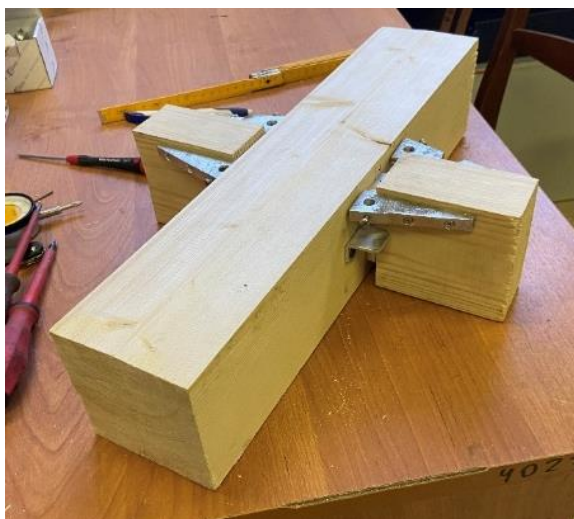
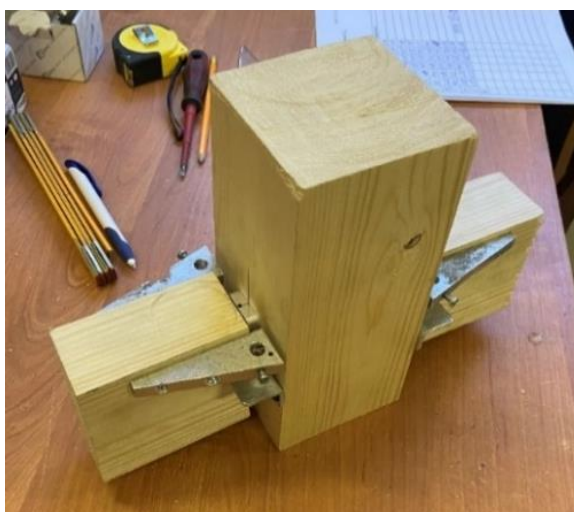


Рис. 1. Общий вид образца №1



**Рис. 2.** Общий вид образца №2



**Рис. 3.** Общий вид образца №3



**Рис. 4.** Общий вид образца №4

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Составлена и отработана методика испытаний образцов нагружением ступенями с периодической разгрузкой. Испытаны разработанные образцы, из четырех вариантов конструкций выбран один-под номером 4. Определено, что конструкция этого образца наиболее полно отражает действительную работу реальных соединений деревянных

элементов, обеспечивает корректную последовательность включения в работу элементов и их деформативность после приложения нагрузки.

Образец под номером 4 изготовлен из деревянных элементов 50\*100\*250 мм (b\*h\*L) (главные балки) и элемента 50\*100\*120 мм (b\*h\*L) (второстепенная балка). Между главными и второстепенной балками с помощью шурупов Ø 4,5 мм закреплены алюминиевые накладки SHERPA 70\*30 мм (h\*b). Испытания проведены согласно требованиям ГОСТ 33082-2014. Образцы нагружались ступенчато с периодическим разгрузением и определением прочностных и деформационных показателей соединений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируя результаты проведенных испытаний, было определено, что после начала нагружения образца включились в работу шурупы, началось их выдергивание и деформация, после этого начались пластические деформации алюминиевых накладок и деформации деревянных элементов в гнездах под шурупы. Определено, что остаточные деформации соединения составляют в среднем 79.9% от полных деформаций, упругие деформации – 20.1% в пределах упругой работы соединения.

На основании проведенных исследований определены особенности работы изучаемых соединений, осуществлена разработка образца соединения цельнодеревянного элемента и стальной накладки для дальнейшей разработки мер, направленных на повышение несущей способности и снижение деформативности изучаемых соединений без значительных материальных затрат, связанных с покупкой дорогостоящих накладок SHERPA.

Конструкция образца состоит из деревянного элемента 50\*100\*250 мм (b\*h\*L) и закрепленной к его торцу с помощью шурупов металлической накладки (плоской пластины с просверленными отверстиями под шурупы без элементов, осуществляющих сопряжение накладок друг с другом). Изготовление образцов соединений осуществлено по принятой схеме, представленной на рисунке 5.

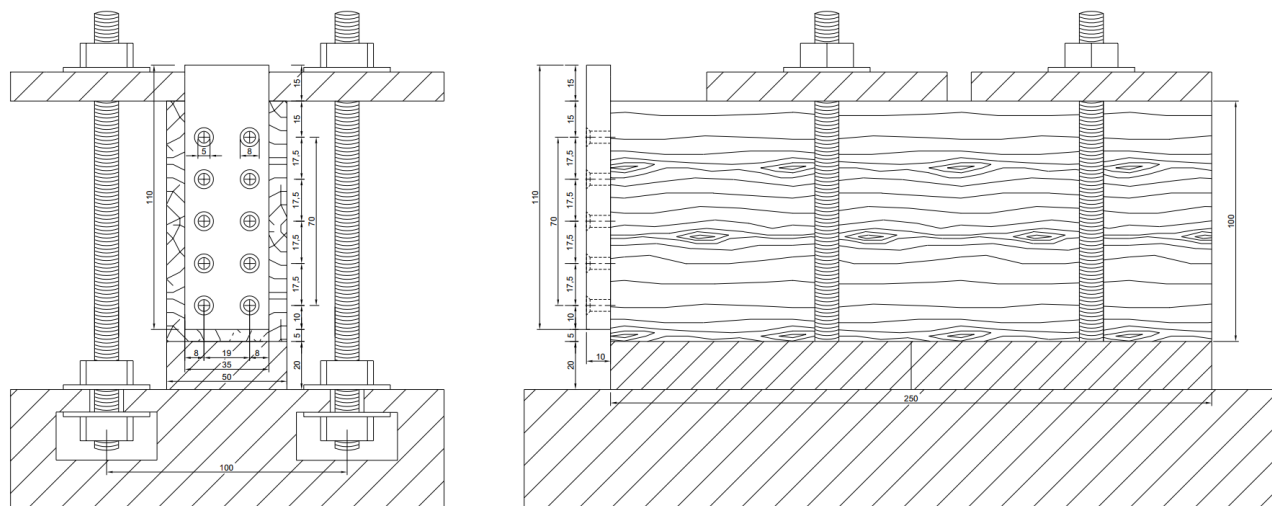
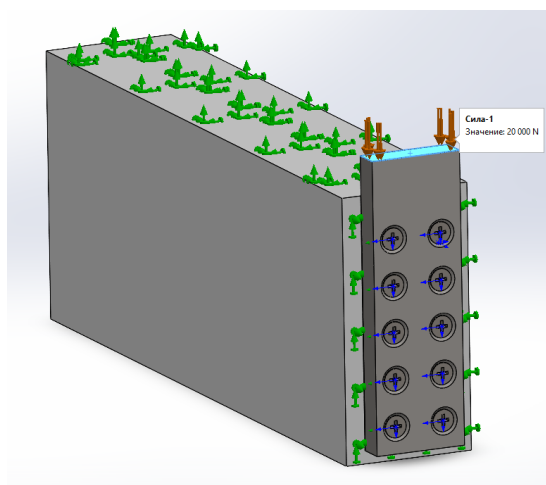


Рис. 5. Схема испытываемого образца

Была разработана методика проведения испытаний, образцы будут испытаны по сжатой схеме, нагружением с периодической разгрузкой. С целью проверки планируемых экспериментальных результатов будет использован метод конечных элементов (МКЭ). Разработана модель для вычисления несущей способности и деформативности соединений. На рисунке 6 показан общий вид модели исследуемого соединения. После выполнения расчета будет определено, насколько правильно и полно отражает работу реального объекта аппроксимирующая модель работы проектируемого объекта.





**Рис. 6.** Общий вид модели исследуемого соединения

## ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование четырех разработанных образцов, а также изучение научных публикаций по тематике исследования позволили разработать конструкцию образца, позволяющего проводить разработку мер, направленных на повышение несущей способности и снижение деформативности изучаемых соединений без значительных материальных затрат, связанных с покупкой накладок SHERPA [8,9,10,11,12,13,14,15].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Schickhofer G., Nachweisführungen für Konstruktionen aus Holz/ Holzbau. 2006. Vol. 68. pp. 373-374.
2. Strassmann B., Die Kunst des Anziehens/ Die Zeit. 2005. Vol. 1. pp. 1-20.
3. EN 1995-1-1:2004: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauteilen – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Europäisches Komitee für Normung (CEN).
4. Europäische technische Zulassung ETA-12/0067, Sherpa Serien XS, S, M, L, XL und XXL.
5. Europäische technische Zulassung ETA-15/0540, Sherpa Power Base C, S and F.
6. Europäische technische Zulassung ETA-18/0083, Sherpa CLT-Connector.
7. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.
8. DIN 1052:2008: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
9. SIA 265:2003. Bauwesen - Holzbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
10. EN 338:2003 Structural timber – Strength classes.
11. CEN EN 14081-1:2016+A1-2019 Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section.
12. EN 1194 Timber structures - Glued laminated timber - Strength classes and determination of characteristic values.
13. DIN EN 14374-2005 Timber structures - Structural laminated veneer lumber.
14. DIN EN 14080-2013 Timber structures - Glued laminated timber and glued solid timber.
15. EN 573-3 Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products.

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.А. Мишуренко<sup>1</sup>, А.А. Семенов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4,

<sup>1</sup>*nikolai8421@mail.ru*

<sup>2</sup>*sw.semenov@gmail.com*

## Аннотация

Данная работа посвящена обзору перспектив развития компьютерного моделирования и расчета тонкостенных оболочечных конструкций. Проанализированы основные направления исследований оболочек, которые можно представить следующим образом: развитие теорий ползучести и нелинейности (физической и геометрической), уточнение величин критических напряжений, согласование между собой экспериментальных и теоретических результатов исследований, определение наиболее опасных видов нагрузок для оболочек. Проведен обзор исследований моделирования влияния несовершенств (дефектов) на напряженно-деформированное состояние конструкций. Рассмотрены методики и алгоритмы задания дефектов (несовершенств) при математическом моделировании. Выявлена актуальная проблема в области оболочечных конструкций: отсутствуют верифицированные и нормативно установленные математические модели тонкостенных оболочечных конструкций, описывающие влияние дефектов на напряженно-деформированное состояние конструкций, в связи с чем затруднительно оценивать прочность и устойчивость возведенных оболочек и, как следствие, осуществлять усиление таких конструкций.

## ВВЕДЕНИЕ

Тонкостенные оболочечные конструкции получили огромное распространение в различных отраслях промышленности: строительство, машиностроение, приборостроение, судостроение, авиастроение, космостроение. Востребовано применение оболочечных конструкций для устройства большепролетных сооружений [1]. Наиболее известными примерами зданий, сооруженных с использованием оболочек, являются: оперный театр в Сиднее, Пекинский оперный театр, Международный аэропорт имени Джона Кеннеди, Токио Доум, Aula Golf Academy и Clubhouse (Рис. 1 [2]). Кроме уникальных объектов, тонкостенные оболочки применяются при строительстве различного рода резервуаров (для хранения жидких и твердых сред), арочников и т.п.



Рис. 1. Здание, возведенное с использованием оболочек [2]

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенность работы тонкостенных оболочечных конструкций заключается в том, что для данных конструкций, в общем случае, прежде исчерпания прочности и потери общей устойчивости, происходит потеря местной устойчивости. В связи с чем возникла необходимость исследования тонкостенных оболочечных конструкций с учетом нелинейных факторов. Основы нелинейной теории оболочек были заложены во второй половине XX века Х. М. Муштари [3], В. З. Власовым [4], А. И. Лурье [5], В. В. Новожиловым [6].

При исследовании оболочек, в общем случае, основным подходом являлось изучение конструкции с учетом проявления конкретного свойства материала (физическая нелинейность, ползучесть). Комплексный подход к исследованию тонкостенных оболочечных конструкций можно найти в работах В. В. Карпова [7–8].

В работе [7] представлены математические модели деформирования подкрепленных оболочек с учетом нелинейности (физической и геометрической), возможности развития деформаций ползучести при длительном нагружении. Разработана математическая модель деформирования оболочек в единой системе координат, отличающаяся тем, что координаты направлены по линиям главных кривизн оболочек. Представленная математическая модель предназначена для упрощения соотношений теории оболочек и приведения к единообразию. Обозначены основные численные методы, применяемые для решения задач прочности и устойчивости оболочек. Разработаны вычислительные алгоритмы, предназначенные для сведения исходной нелинейной задачи к решению линейных задач.

Работа [8] отражает результаты исследований прочности и устойчивости различного вида оболочечных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности, ползучести.

В XXI веке, в связи с появлением новых алгоритмов расчета тонкостенных оболочечных конструкций и развитием потенциала ЭВМ, возникли несоответствия между экспериментальными и теоретическими результатами исследований. Данная проблематика освещена в исследованиях [9, 10].

В. В. Пикулем [9] выдвинута гипотеза высвобождения потенциальной энергии деформированных элементов оболочки в момент потери устойчивости. Данное предположение позволило связать между собой теорию устойчивости оболочечных конструкций с экспериментальными данными.

В исследовании [10] предлагается разъяснение причин расхождения экспериментальных и теоретических данных: в качестве критерия глобальной потери устойчивости оболочек приняты нижние критические напряжения, которые в современных вычислениях оцениваются близкими к нулю. Для обеспечения совпадений результатов экспериментов и вычислений предлагается использование динамической нелинейной трехмерной теории упругости.

Исследованию прочности композитных оболочечных конструкций в задачах динамики посвящена работа Н. А. Абросимова и А. В. Елесина [11].

Авторами [11] представлена методика численного моделирования прогрессирующего разрушения при циклических динамических нагружениях. Верификация представленной методики осуществлялась сравнением результатов вычислительного и лабораторного экспериментов.

А. А. Семеновым разработана методика исследования прочности и устойчивости тонкостенных ортотропных оболочечных конструкций [12].

Интересен подход к моделированию тонкостенных оболочечных конструкций, ослабленных вырезами [13].

Исследование [13] представляет математическую модель деформирования изотропных перфорированных пологих оболочек двойкой кривизны. Введение ослаблений – вырезов осуществляется двумя способами: дискретно и методом конструктивной



анизотропии. По результатам анализа устойчивости оболочек обосновано использование метода конструктивной анизотропии при расчете устойчивости перфорированных пологих оболочек двойкой кривизны.

M. Qatu, E. Asadi и W. Wong представляют обзор исследований прочности и устойчивости оболочек, проведенных в 2000-2010 годы зарубежными учеными [14].

L. A. Godoy проведено исследование нагрузок, при которых происходит потеря устойчивости вертикальных резервуаров для хранения нефти [15], по результатам которого установлено, что, в большинстве случаев, ветровое воздействие принимается как наиболее частая причина потери устойчивости данных конструкций, однако для данных оболочечных конструкций, с учетом особенности их назначения, более опасным является высокотемпературное воздействие пожара, которое проявляет себя в случае аварий на нефтегазовых объектах.

Современные направления исследований тонкостенных оболочечных конструкций базируются на учете геометрической нелинейности, физической нелинейности, ползучести, вследствие чего разработка математических моделей и применение алгоритмов исследования прочности и устойчивости конструкций невозможны без использования ЭВМ. Инженерные комплексы программ предназначены для расчета строительных конструкций и грунтовых оснований прикладного характера, и зачастую не позволяют досконально исследовать тонкостенные оболочечные конструкции с учетом нелинейности и ползучести. В связи с этим, для выявления особенностей и закономерностей деформирования тонкостенных конструкций с учетом различных свойств материала, а также их научного обоснования, необходимо разрабатывать специализированное программное обеспечение.

Так, например, на базе Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета В. В. Карповым, Д. А. Барановой, Р. Т. Беркалиевым был разработан программный комплекс «Оболочка» [16]; В. В. Карповым и А. А. Семеновым был разработан программный комплекс «DimShell: dimensionless calculations of orthotropic shells» [17].

ПК «Оболочка» [16] предназначен для исследования устойчивости и прочности тонкостенных оболочечных конструкций с учетом нелинейного деформирования и ползучести материалов. «DimShell: dimensionless calculations of orthotropic shells» [17] предназначена для исследований прочности и устойчивости ортотропных оболочечных конструкций с осуществлением расчетов в безразмерных параметрах.

Исследование [18] посвящено подробному обзору основных критериев разрушения композитных материалов, используемых программными комплексами при выполнении прочностных расчетов оболочечных конструкций.

Независимо от назначения конструкции, должна обеспечиваться надежность объекта в течение всего жизненного цикла, однако в связи с физическим износом конструкций проявляется коррозия материалов, в связи с некачественно выполненными строительно-монтажными работами возникают дефекты, что в конечном счете негативно сказывается на несущей способности конструкции.

Основные направления исследований тонкостенных оболочек предназначены для проектирования новых конструкций. Ослабление конструкции вырезами является следствием особенностей технологических процессов, протекающих внутри здания или сооружения, а не следствием возникновения дефекта. Учет ползучести материала при длительном нагружении характеризует лишь особенности поведения материала, а не физический износ конструкции.

Е. В. Маринченко и М. Г. Селезневым проведено исследование динамических характеристик зданий и сооружений с учетом наличия дефектов (трещин) в конструкциях методом конечных элементов (МКЭ) [19]. Исследовано влияние точности учета характера дефектов (трещин) на результаты динамических характеристик.

Оценка влияния дефектов на напряженно-деформированное состояние конструкций с помощью МКЭ представлено в исследовании [20]. По результатам исследования установлено, что наибольшая точность значений достигается при учете геометрической нелинейности.

Подход к развитию математических моделей оболочечных конструкций представлен в [21]: математическое моделирование осуществляется с учетом истинной формы конструкции (учитываются все несовершенства формы) и установленных фактических физико-механических характеристик материалов.

Учет начальных несовершенств в конструкции при расчете устойчивости представлен в исследовании В. В. Зверева, Н. Ю. Тезикова и К. Е. Жидкова [22], по результатам которого установлено, что наличие вмятин в ряде случаев оказывает положительный эффект на напряженно-деформированное состояние.

Методика оценки остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров с учетом трещин представлена Г. Х. Самигуллиным и А. А. Герасименко [23].

Математические модели композитных конструкций с дефектами представлены в исследованиях [24, 25]. Алгоритмы моделирования композитных конструкций представлены в [26, 27].

## ВЫВОДЫ

На данный момент отсутствуют верифицированные и нормативно закреплённые математические модели тонкостенных оболочечных конструкций, описывающие влияние дефектов на напряженно-деформированное состояние конструкций, в связи с чем затруднительно оценить прочность и устойчивость фактических конструкций с учетом дефектов.

Наряду с проблемой оценки фактического состояния уже возведенных тонкостенных оболочечных конструкций с учетом дефектов, возникает проблема усиления данных конструкций. Современные программные комплексы не предназначены для моделирования их усиления.

Таким образом, можно сделать вывод, что моделирование усиления тонкостенных оболочечных конструкций с учетом дефектов является актуальным. Дальнейшее исследование будет направлено на разработку математической модели, описывающей дефекты в конструкции и способы ее усиления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривошапко С.Н.* О возможностях оболочечных сооружений в современной архитектуре и строительстве // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* 2013. № 1. С. 51–56.
2. Artforlife : сайт. – URL: <https://artforlife.ru/prochie-tematiki/arhitektura-oppengejma-zavershaet-ayla-clubhouse-amp-golf-academy.html> (дата обращения: 10.11.2021). – Текст. Изображение : электронные.
3. *Муштару Х.М., Галимов К.З.* Нелинейная теория упругих оболочек // Казань: Такнигоиздат. 1957. 431 С.
4. *Власов В.З.* Общая теория оболочек и ее приложение в технике // М.; Л.; Гостехиздат. 1949. 784 С.
5. *Лурье А.И.* Общая теория упругих тонких оболочек // *Прикладная математика и механика.* 1940. Т. 4. № 2.
6. *Новожилев В.В.* Теория тонких оболочек // Л.: Судпромиздат. 1962. 431 С.
7. *Карпов В.В.* Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: в 2 ч. Ч.1: Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения // М.: Физматлит. 2010. 288 С.
8. *Карпов В.В.* Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения: в 2 ч. Ч.2: Вычислительный эксперимент при статическом механическом воздействии // М.: Физматлит. 2011. 248 С.
9. *Пикуль В.В.* Современное состояние теории устойчивости оболочек // *Вестник ДВО РАН.* 2008. № 3. С. 3–9.
10. *Грачев В.А., Найштут Ю.С.* Задачи устойчивости тонких упругих оболочек // *Компьютерные исследования и моделирование.* 2018. Т. 10. № 6. С. 775–787. DOI 10.20537/2076-7633-2018-10-6-775-787.
11. *Абросимов Н. А., Елесин А.В.* Численный анализ динамической прочности композитных цилиндрических оболочек при многократных импульсных воздействиях // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика.* 2016. № 4. С. 7–19. DOI

- 10.15593/perm.mech/2016.4.01.
12. *Semenov A. A.* Strength and stability of geometrically nonlinear orthotropic shell structures // *Thin-Walled Structures*. 2016. Т. 106. С. 428–436. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.018.
  13. *Каменев И.В., Семенов А.А.* Обоснование использования метода конструктивной анизотропии при расчете пологих оболочек двоякой кривизны, ослабленных вырезами // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2016. № 2. С. 54–68.
  14. *Qatu M., Asadi E., Wang W.* Review of Recent Literature on Static Analyses of Composite Shells: 2000-2010 // *Open Journal of Composite Materials*. 2012. Т. 2. № 3 С. 61–86. DOI: 10.4236/ojcm.2012.23009.
  15. *Godoy L.A.* Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies // *Thin-Walled Structures*. 2016. Т. 103, С. 1–21. DOI:10.1016/j.tws.2016.01.026.
  16. *Карнов В.В., Баранова Д.А., Беркадиев Р.Т.* Программный комплекс исследования устойчивости оболочек // СПб.: СПбГАСУ. 2009. 102 С.
  17. *Карнов В.В., Семенов А.А.* DimShell: dimensionless calculations of orthotropic shells (программа для ЭВМ) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661781, РФ от 09.11.2015 г.
  18. *Гриневич Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В.* Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7(79). С. 92–111. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
  19. *Маринченко Е.В., Селезнев М.Г.* Влияние дефектов на количественные и качественные характеристики колебаний элементов строительных конструкций // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2005. № S1. С. 17–21.
  20. *Агапов В.П., Бычков А.В.* Моделирование дефектов в конструкциях из композитных материалов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2006. № 1. С. 102–106.
  21. *Пузырев А.М., Рябов В.М., Тумашик Г.А., Шитов А.И.* О развитии технологии математического моделирования состояния нагруженных оболочечных конструкций подводной техники, имеющих начальные (построечные) отклонения от идеальной формы // *Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова*. 2010. № 56(340). С. 31–42.
  22. *Зверев В.В., Тезиков Н.Ю., Жидков К.И.* Устойчивость конического днища рубашки двустенного стального горизонтального резервуара подземного исполнения с учётом начальных несовершенств // *Строительная механика и конструкции*. 2019. № 1(20). С. 52–59.
  23. *Самигуллин Г.Х., Герасименко А.А.* К вопросу о методике расчета остаточного ресурса резервуаров с трещиноподобными дефектами // *Электронный научный журнал Нефтегазовое дело*. 2013. № 3. С. 263–272.
  24. *Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Федонюк Ю.В.* Численное моделирование деформирования и прочности трехслойных композитных конструкций с дефектами // *Математическое моделирование и численные методы*. 2016. № 3(11). С. 3–23.
  25. *Захарова Ю.В., Лохматов Л.Г.* Моделирование напряженно-деформированного состояния композиционных оболочек с дефектами // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2016. № 11(59). С. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-11-1552.
  26. *Урнев А.С., Чернятин А.С., Матвиенко Ю.Г., Разумовский И.А.* Моделирование трещиноподобных дефектов в слоистой композитной конструкции // *Машиностроение и инженерное образование*. 2017. № 3(52). С. 64–72.
  27. *Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Осокин В.М., Третьяков А.А., Писарев П.В.* Моделирование технологических дефектов и оценка их влияния на статическую прочность композитных фланцев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2016. № 2. С. 5–21. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.01.

# КРУЧЕНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

В.А. Люблинский<sup>1</sup>, Н.Н. Люблинская<sup>2</sup>, Е.Д. Полубарова<sup>1</sup>, Ю.В. Хмелевская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>Московский финансово-промышленный университет «Синергия», 129090, г. Москва, ул. Мещанская, д. 9/14, стр.1,

<sup>1</sup>lyublinskiyva@mgsu.ru

<sup>2</sup>nata3407@mail.ru

## Аннотация

Несимметричное расположение в плане вертикальных несущих элементов, лестнично-лифтовых узлов, ядер жесткости приводит к появлению эксцентриситета между центром масс и центром жесткостей. В дальнейшем при действии горизонтальной нагрузки в несимметричных несущих системах возникает кручение. В данной работе рассматривается сопротивление многоэтажных зданий при возникновении кручения, вызванного несимметричным расположением вертикальных несущих элементов. Объектом исследования являлась несущая система жилого монолитного многоэтажного здания с неявно несовпадающим центром масс и центром жесткостей.

Численным моделированием на горизонтальную нагрузку определено напряженно-деформированное состояние вертикальных железобетонных конструкций. Определено изменение усилий и перемещений в пилонах здания. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при проектировании несущих систем многоэтажных зданий.

## ВВЕДЕНИЕ

В несимметричных несущих системах при несовпадении центра жесткостей и центра масс возникает кручение. И хотя элементы жесткости работают в своей плоскости, вертикальные связи между ними, работающие на сдвиг, и диски перекрытий создают сложное напряженно-деформированное состояние в железобетонных конструкциях.

Пилоны, диафрагмы жесткости, ядра жесткости сопротивляются изгибу со стесненным кручением [1]. При несовпадении центра масс и центра жесткостей в многоэтажных зданиях возникает кручение [1-5], (см. рис.1). Диски перекрытий вращаются относительно центра жесткостей и очевидно, что кривая кручения является пространственной кривой.

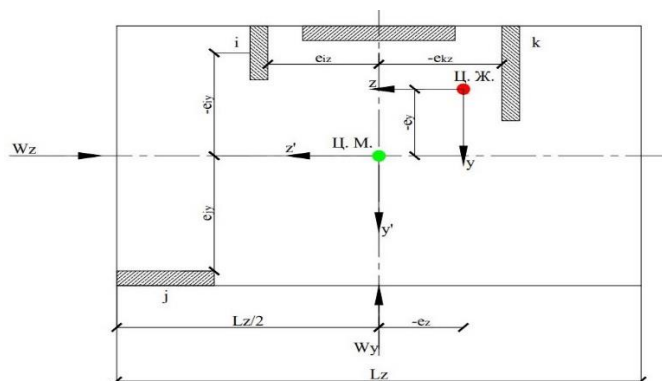


Рис. 1. Возникновение кручения в плане здания

Координаты центра поворота или центра жесткостей можно определить по следующим зависимостям [1]:

$$e_y = \frac{\sum_{i=1}^n B_{iy} e_{iy}}{\sum_{i=1}^n B_{iy}} \quad (1)$$

$$e_z = \frac{\sum_{i=1}^n B_{iz} e_{iz}}{\sum_{i=1}^n B_{iz}}$$

где  $B_{iy} = (EI_y)_i$ ,  $B_{iz} = (EI_{xz})_i$  – изгибные жесткости элемента  $i$  относительно его собственных центральных осей, параллельных координатным осям  $Y$  и  $Z$ ;

$e_{iy}, e_{iz}$  – координаты центра поперечного сечения элемента  $i$  относительно осей  $Y$  и  $Z$ .

При формировании несущей системы для увеличения изгибной жесткости целесообразно элементы жесткости располагать симметрично в плане относительно двух осей  $Y$  и  $Z$  и как можно дальше от центра масс. Диафрагмы жесткости можно разместить по торцам зданий или на возможно дальней периферии несущей системы. Вместе с тем при возникновении кручения именно эти элементы будут подвергнуты в лучшем случае дополнительным изгибающим моментам, величина которых будет зависеть от величины кручения перекрытий и места расположения несущего элемента относительно центра масс. В случае несимметричного расположения элементы жесткости, включая ядра жесткости, изгибаются и скручиваются. Внешний изгибающий момент воспринимается сопротивлением этих конструкций изгибу, а внешний крутящий момент – их сопротивлению чистому и изгибному кручению. Плоские диафрагмы жесткости практически не сопротивляются чистому кручению.

И ветровая нагрузка и тем более сейсмическая, могут привести близости крутильных колебаний к низшим формам колебаний [4,6,7]. Появляются дополнительные инерционные силы. Динамическое воздействие ветра или сеймики может создать дополнительные напряжения в несущих конструкциях здания и к перенапряжению торцевых периферийных элементов несущей системы. Снижение возможного кручения возможно за счет эффективной работы ядер жесткости в составе лестнично-лифтовых узлов.

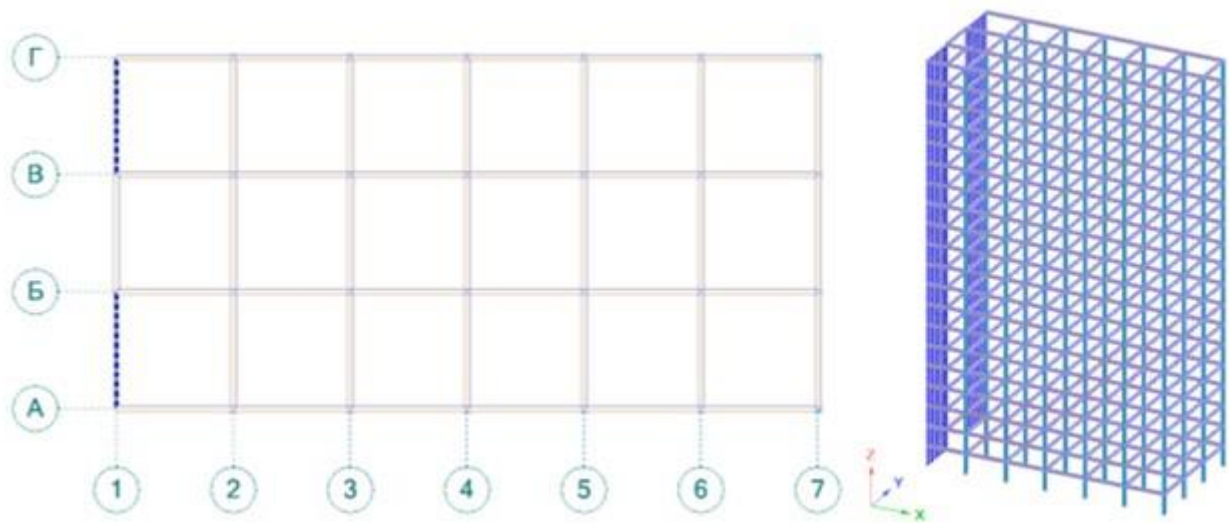
Следует заметить, что при кручении ядро-диафрагменных систем возникает депланация поперечного сечения конструкций [1]. Связи сдвига, создающие пространственную несущую систему, работают не только в условиях некоторого одноосного напряженного состояния [8,9], но и подвергаются дополнительному воздействию в виде кручения. В монолитных конструкциях при изгибе и сжатии в поперечных сечениях конструкций может возникнуть крутящий момент, приводящий к сложному напряженно-деформированному состоянию [10], которое при сейсмическом воздействии сопоставим с условиями [11, 12].

В данной работе в первом приближении численным моделированием была рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния вертикальных железобетонных конструкций наиболее отдаленных от центра масс несущей системы. В качестве объекта исследования использовалась реальная несущая система и тестовые несущие системы.

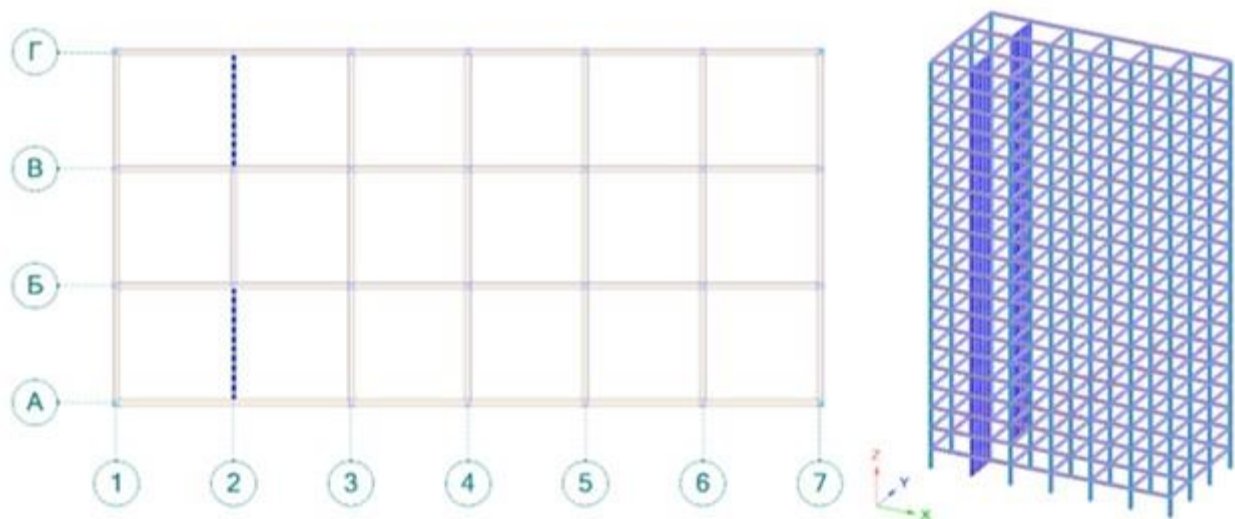
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для понимания влияния кручения на несущие системы зданий проведены параметрические исследования на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса LIRA, аналогичные работе [4]. На рисунках 2-5 показаны типичные несущие конструкции каркаса с несимметричным расположением диафрагм жесткости. Колонны приняты сечением 40x40 см, балки – 30x40 см, стенки жесткости приняты толщиной 20 см. Высота этажа принята 3 м, количество этажей – 20. Бетон принят – В25. Здание находится в III ветровом районе, ветровое давление – 0,38 Кпа, тип местности - А.

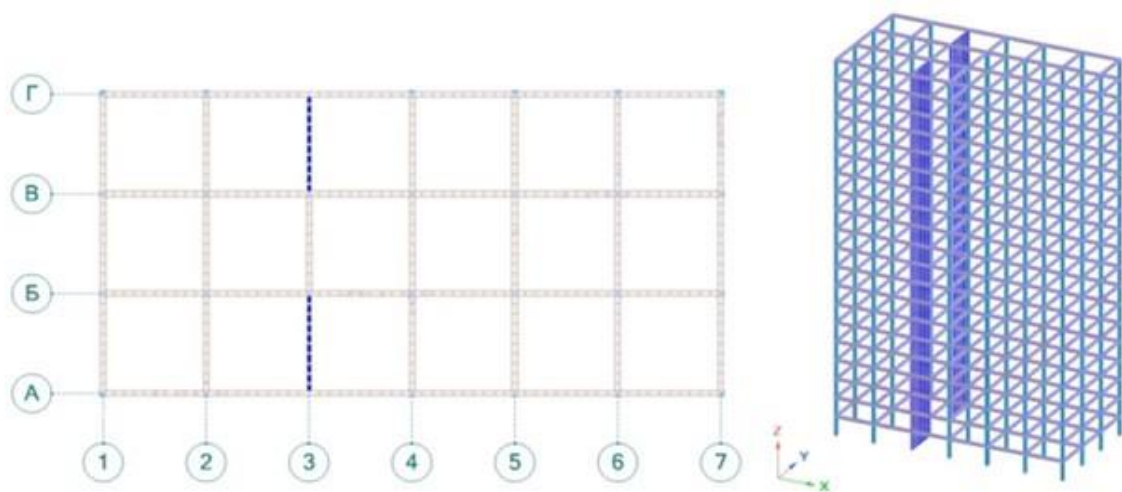
Колонны и ригеля моделировались линейными конечными элементами, а плиты перекрытий и стенки жесткости конечными элементами оболочки.



**Рис. 2.** Расчетная схема 1. Диафрагмы жесткости по оси 1.



**Рис. 3.** Расчетная схема 2. Диафрагмы жесткости по оси 2.



**Рис. 4.** Расчетная схема 3. Диафрагмы жесткости по оси 3.

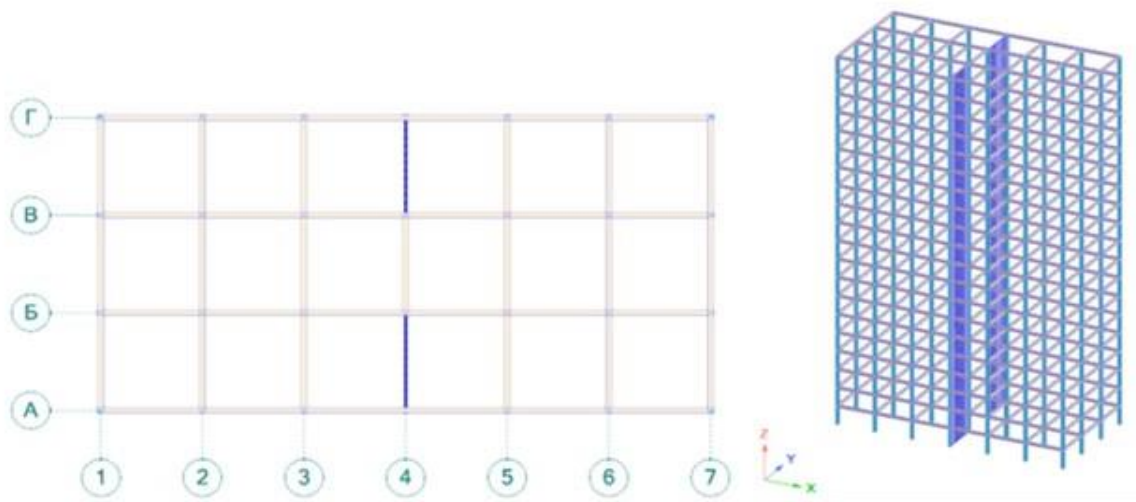


Рис. 5. Расчетная схема 4. Диафрагмы жесткости по оси 4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате сопротивления представленных выше несущих систем получены усилия в вертикальных конструкциях и перемещения зданий.

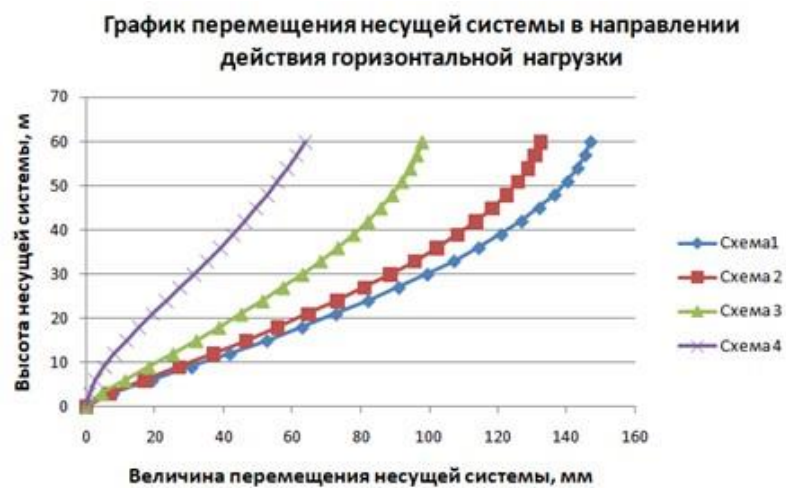


Рис. 6. Перемещения несущих систем в направлении действия горизонтальной нагрузки.

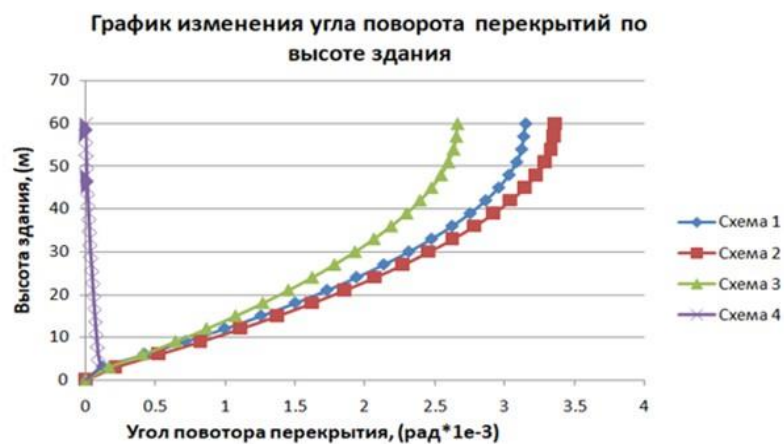
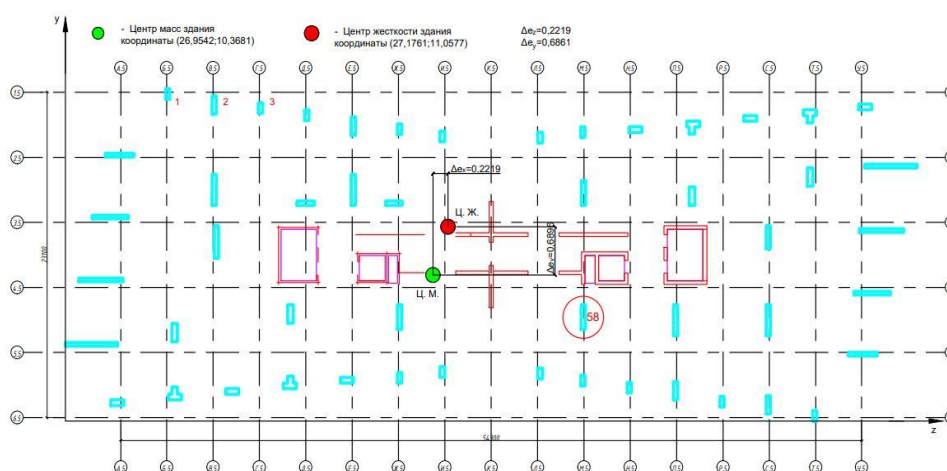


Рис. 7. Изменения угла поворота перекрытий по высоте здания.



Реальные многоэтажные здания содержат большое количество различных элементов жесткости. И не всегда можно оценить наличие реального смещения центра жесткостей относительно центра масс и вклад кручения на итоговые результаты определения напряженно-деформированного состояния конструкций и перемещений, углов поворота всей несущей системы. На рисунке 9 показаны несущие элементы построенного монолитного 31-этажного здания в г. Москве по ул. Дыбенко в пределах ТПУ «Ховрино». Габариты здания в осях в плане составляют 54,30 x 23,10 м. Максимальная высотная отметка по парапету кровли - 95,30 м. Бетон принят класса В30, В40, арматура класса А500С. В качестве элементов жесткости использовались несущие конструкции лестнично-лифтовых узлов, пилоны и диафрагмы жесткости. Толщина этих конструкций варьируется по осям здания и по высоте. Например, ядра жесткости имеют толщину от 25 до 40 см. Пилоны и колонны приняты толщиной 30 см.

Было определено положение центра масс и центра жесткостей. Отклонение по оси Y составило 0,69 м, по оси Z – 0.22 м. С целью оценки влияния кручения выбран пилон № 58,



**Рис. 1.** Расчетная схема монолитного 31-этажного здания как наиболее нагруженный вертикальный элемент. Добавочный изгибающий момент от кручения в первом приближении можно определить в соответствии с [1]. Для пилона он составил 14,8% от изгибающего момента без учета кручения.

## ВЫВОДЫ

Несущие системы многоэтажных зданий обладают несимметричным расположением вертикальных железобетонных конструкций. Центр масс и центр жесткостей в силу архитектурных и конструктивных особенностей не совпадают друг с другом. При действии горизонтальной нагрузки возникает кручение, которое оказывает влияние на работу элементов жесткости. Часть железобетонных конструкций догружается моментом от кручения, часть разгружается. Добавка может быть существенной для элементов жесткости наиболее удаленных от центра здания. Но это в плоскости несущих конструкций. Связи и сами конструкции могут испытывать дополнительные крутящие усилия в плоскости своего поперечного сечения. Кручение несимметричных систем вызывает сложное поведение несущих конструкций. Относительное ограничение кручения в условиях проектных и запроектных воздействий необходимо для оценки возможного или недопустимого риска.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов П. Ф. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов // М.: Стройиздат, 1977. С. 78-89.
2. Naresh Kumar B. G., Punith N., Bhyrav R.B. Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for



- different setback buildings //Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT). – 2017. – Т. 6. – pp. 801-804.
3. *Botis M., Cerbu C.* A Method for Reducing of the Overall Torsion for Reinforced Concrete Multi-Storey Irregular Structures //, Applied Sciences, 10, 5555, (2020), DOI:10.3390/app10165555.
  4. *Hussein G., Eid N., Khaled H.* Torsional behavior of irregular structures during Earthquakes//Journal of Mechanical and Engineering, V.16, I. 5, Ser. IV, pp. 40-55 (2019), DOI: 10.9790/1684-1605044055.
  5. *Khatiwada P., Lumantarna E.* Simplified Method of Determining Torsional Stability of the Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings// Civil Engineering. - 2021, 2, pp. 290-308.
  6. *Dimova S.L., Alashki I.* Seismic design of symmetric structures for accidental torsion// Bull. Earthquake Eng.2003, 1, pp. 303–320.
  7. *Manish 2, Syed Z.I.* Seismic analysis of torsional irregularity in multi-storey symmetric and asymmetric buildings//Eurasian J. Anal. Chem. 2017, 13, pp. 286–292.
  8. *Lyublinskiy V., Struchkov V.* Resistance of Vertical Joints During Torsion of Multistorey Buildings. In: Akimov, P., Vatin, N., Tusnin, A., Doroshenko, A. (eds) Proceedings of FORM 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 282. Springer, Cham. (2022). DOI:10.1007/978-3-031-10853-2\_38.
  9. *Люблинский В.А., Стручков С.В., Задорина Л.В.* К определению податливости плотных связей панельных многоэтажных зданий при кручении несущей системы // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования. Москва: Из-во МИСИ-МГСУ, 2022. С. 107-112.
  10. *Колчунов В.И., Демьянов А. И., Протченко М.В.* Моменты в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением. //Строительство и реконструкция. 2021;(3):27-46. DOI:10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46.
  11. *Тамразян А.Г.* Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов —необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». 2009. № 1.С. 160–171.
  12. *Травуш В.И., Колчунов В.И., Клюева Н. В.* Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство, 2015, № 3, с.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЭТАПНО ВОЗВОДИМОЙ СБОРНО-МОНОЛИТНОЙ РАМЫ

**А.А. Коянкин**

*ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79,  
KoyankinAA@mail.ru*

## **Аннотация**

С целью исследования особенностей формирования напряжённо-деформированного состояния сборно-монолитного каркаса с учётом этапности процессов возведения и загрузки проведены соответствующие экспериментальные исследования плоской рамы каркаса. Особенностью исследований являлось поэтапность монтажа и приложения нагрузки – на 1-м этапе монтировались сборные элементы (колонны и сборные части ригелей), которые загружались монтажной нагрузкой (собственный вес, вес других сборных элементов и вес монолитного бетона), а на 2-м этапе происходила укладка монолитного бетона и после набора им требуемой прочности прикладывалась дополнительная нагрузка, моделирующая вес конструкций пола, перегородок, несущих стен и эксплуатационную нагрузку.

В результате проведённых экспериментальных исследований получены новые данные касающиеся особенностей формирования напряжённо-деформированного состояния сборно-монолитного каркаса. Получен характер деформирования каркаса до и после укладки монолитного бетона и вовлечения его в процесс деформирования.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время сборно-монолитное строительство активно развивается [1-4], что неизбежно приводит к увеличению необходимости более подробного изучения конструктивных особенностей данного вида конструктивных систем. Проводятся исследования по изучению тех или иных аспектов, влияющих на напряжённо-деформированное состояние (НДС) как отдельных сборно-монолитных элементов, так и зданий, и сооружений в целом.

Авторами работ [5...7] изучалось влияние различных конструктивных особенностей, а также поэтапности возведения на процесс деформирования и конструктивной надёжности сборно-монолитных конструкций.

В рамках работы [8] проведены экспериментальные исследования сборно-монолитного и монолитного перекрытий с приведением данных о несущей способности, деформативности и трещиностойкости, а также дана оценка НДС.

На основании изучения имеющихся к настоящему моменту времени опыта сборно-монолитного домостроения и выполненных научных исследований было принято решение о необходимости более расширенного изучения особенностей формирования НДС сборно-монолитного здания с учётом поэтапности монтажа как каркаса в целом, так и отдельных его конструктивных элементов (плиты, балки перекрытия), где, к примеру, вначале устанавливается сборная часть, а далее монолитная. В конечном итоге эти конструктивные особенности приводят не только к одновременному включению в процесс деформирования отдельных частей сборно-монолитных элементов, но и к существенному изменению конструктивной схемы в целом (образование неразрезных балок и плит перекрытия, возникновение жёсткого узла сопряжения ригелей с колоннами, повышение степени статической неопределимости системы и прочее).

Цель – изучение особенностей формирования НДС сборно-монолитной плоской рамы с учётом её поэтапного монтажа и загрузки. Для достижения поставленной цели проводились соответствующие экспериментальные исследования.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи: разработка методики экспериментальных исследований плоского каркаса сборно-монолитной рамы с учётом поэтапного монтажа и загрузки; проведение экспериментальных исследований; анализ полученных результатов.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

С целью проведения экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны 2 плоские рамы Р1 и Р2, которые полностью идентичны друг с другом, как с точки зрения конструктивного исполнения, так и в части загрузки.

Модели изготавливались и параллельно загружались в 2 этапа (рис. 1):

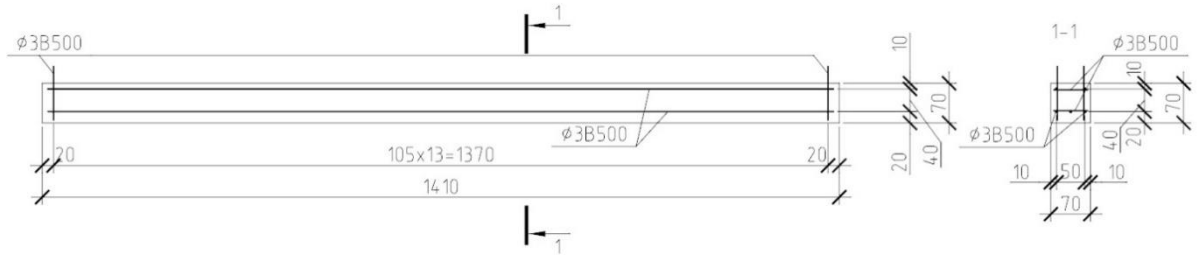
1-й этап:

- на заводе ЖБИ изготовлены сборные части рам (тяжёлый бетон кл. В25) – колонны 70x70x1200(h) мм, армированные 4Ø8А400; сборные части ригелей 70x70(h)x1410 мм, армированные продольной арматурой 3Ø3В500);
- монтаж из сборных элементов плоских двухэтажных двухпролётных рам, габаритами – 2 пролёта, 2 этажа, пролёт 1500 мм, высота этажа 600 мм. На данном этапе плоская рама представляет собой геометрически неизменяемую статически неопределимую систему со следующими граничными условиями: жёсткое защемление колонн с основанием; шарнирное сопряжение ригеля (сборной части) с колонной;
- загрузка предварительной нагрузкой, моделирующей в реальном сооружении нагрузку сборных элементов монтажной нагрузкой (собственный вес самого сборного элемента и опираемых на него других элементов, а также вес монолитного бетона). Нагрузка прикладывалась сосредоточено путём подвеса на гибких тросах бетонных блоков (средний вес 0,55 кН). Загрузка каждого ригеля происходила в 2 шага – по 1 блоку на каждый шаг. Таким образом по окончании 1-го этапа загрузки нагрузка составила  $P = 0,55$  кН.

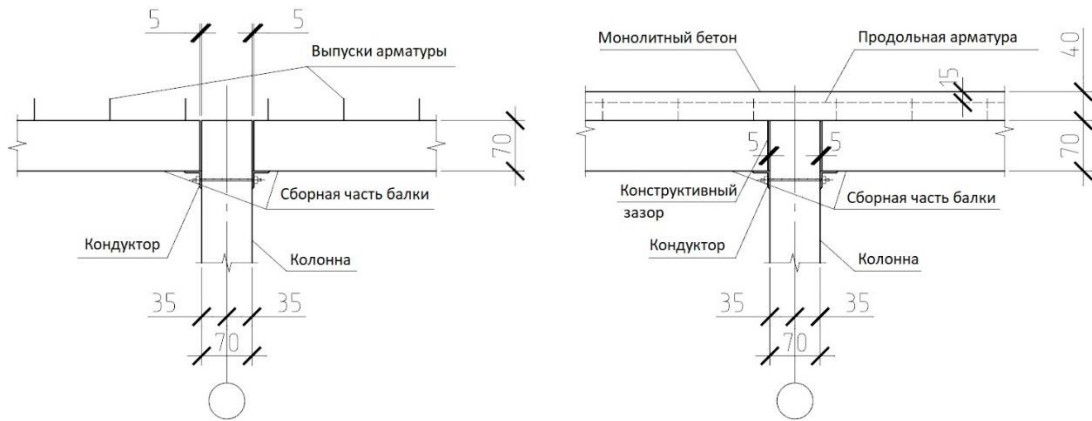
2-й этап:

- не снимая предварительной нагрузки, приложенной на 1-м этапе, укладывался монолитный бетон (керамзитобетон класса В12,5 D1600) высотой 40 мм;
- после набора монолитным бетоном требуемой прочности плоская рама представляла геометрически неизменяемую статически неопределимую систему (с большей степенью неопределимости, нежели на 1-ом этапе) со следующими граничными условиями – жёсткое защемление колонны с основанием и ригеля с колонной;
- осуществлялось загрузка сборно-монолитной конструкции дополнительной нагрузкой, моделирующей монтажную нагрузку, такой как вес конструкций пола, перегородок, несущих стен и т.д., и эксплуатационное загрузка. Для этого между рамами были установлены деревянные балки, на которые укладывались бетонные загрузочные блоки. Максимальная сила  $P$  составила: ригели нижнего яруса – 1,65 кН; ригели верхнего яруса – 2,2 кН и 1,925 кН для правого и левого пролётов, соответственно.

Соблюдался следующий порядок загрузки балок на 2-ом этапе: В2, В1, В4 и В3.

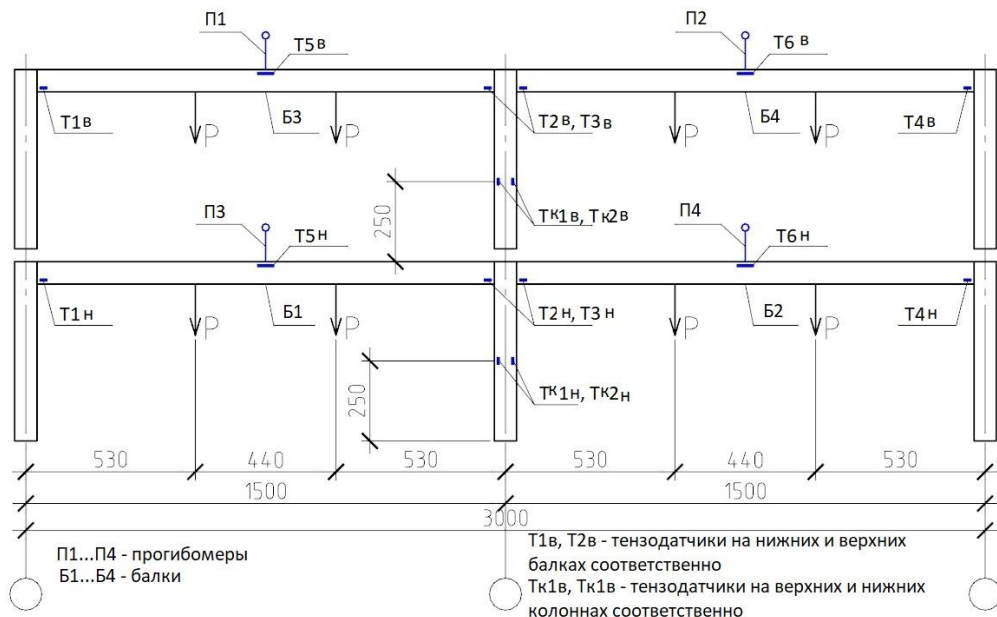


a

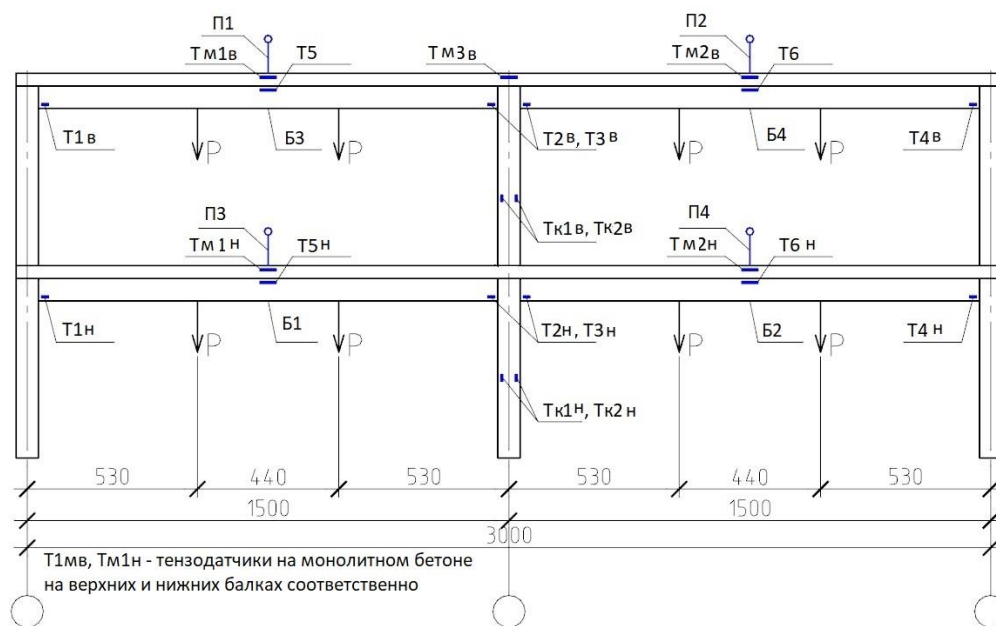


б

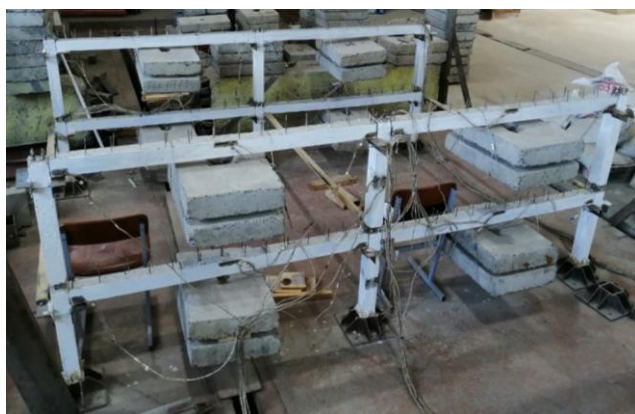
в



2



д



е



ж

**Рис. 1.** Экспериментальная рама: *а* – схема армирования сборной части балок; *б* – узел сопряжения ригеля с колонной на 1-ом этапе; *в* – узел сопряжения ригеля с колонной на 2-ом этапе; *г* – конструктивная схема на 1-ом этапе; *д* – конструктивная схема на 2-ом этапе; *е* – фото рам на 1-ом этапе; *ж* – фото рам на 2-ом этапе

Деформации бетона фиксировались тензометрическими датчиками базой 20, 50 и 60 мм. Прогобы фиксировались прогибомерами, размещаемыми по центру балок.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов проведённых экспериментальных исследований показал (рис. 2):

- разную интенсивность роста прогибов на каждом этапе загрузки. На 1-ом этапе, когда включена в процесс деформирования только сборная часть, нарастание прогибов происходит более интенсивно, нежели на этапе 2, когда в процессе деформирования участвует монолитный бетон;
- в процессе загрузки на 2-м этапе увеличивается прогиб непосредственно загружаемых балок, в то время как балки в смежном пролёте, в силу неразрывности монолитного бетона, испытывают деформации выгиба;
- на 1-м этапе прогибы балок в рамах находились в диапазоне 0,63...0,78 мм при нагрузке  $P = 0,28$  кН и 2,47...2,77 мм при нагрузке  $P = 0,55$  кН;

- на 2-ом этапе в первоначально загружаемых балках Б2 и Б4 прогибы составили 4,40 мм и 3,89 мм, соответственно. После окончания непосредственного нагружения балок Б2 и Б4, и началом нагружения смежных балок Б1 и Б3, прогибы в балках Б2 и Б4 немного снизились, составив на последнем шаге 4,14 мм и 3,73 мм, соответственно.

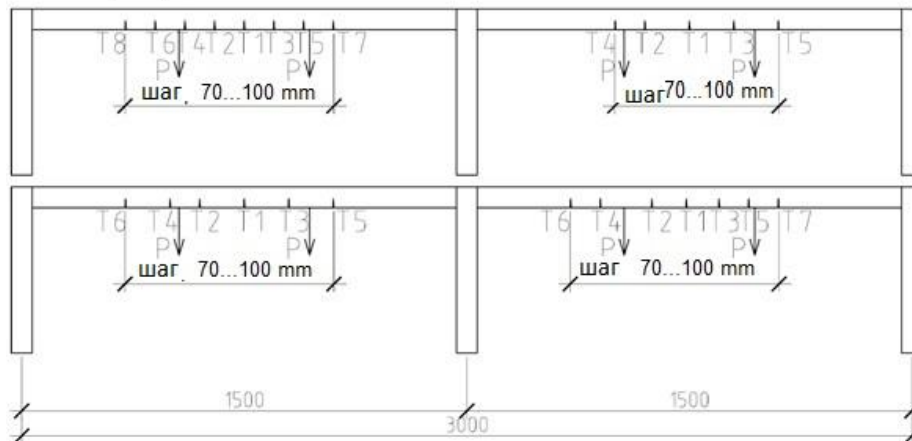
Образование трещин фиксировалось в середине пролёта сборных частей балок на 1-м этапе нагружения (рис. 2,а), т.е. в процессе деформирования только сборной части при нагрузке  $P = 0,55$  кН. Образовавшиеся на 1-ом этапе волосяные трещины имели высоту распространения порядка 20...30 мм, а ширина раскрытия не превышала 0,05 мм. Шаг расположения трещин составлял 70...100 мм.

В рамках 2-го этапа нагружения происходило увеличение ширины раскрытия ранее образовавшихся трещин (рис. 2,б) без существенного роста их высоты. При этом трещины сборной части в пролёте не достигали монолитного бетона.

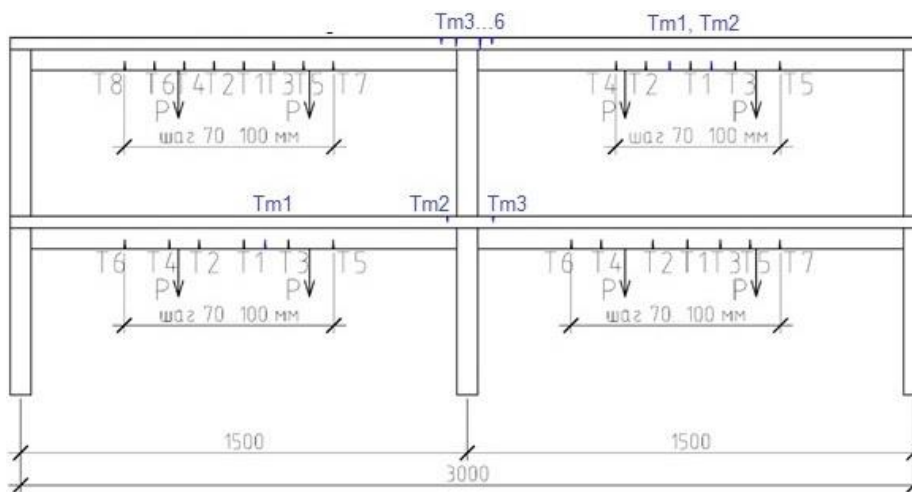
В монолитном бетоне над средней опорой трещины образовывались при нагрузке  $P = 1,93$  кН и более. При это некоторые из трещин на опоре по окончании нагружения 2-го этапа пересекли полностью монолитную часть бетона, но не распространились в сборную часть.

Не фиксировались трещины в колоннах и в балках на крайних опорах, а также отсутствовали горизонтальные трещины, в том числе и по шву сопряжения бетонов.

T1...T8 - трещины



а



б



в



г

**Рис. 2.** Схема образования трещин: а – этап 1; б – этап 2; в – сборная часть на 1-м этапе; г – монолитный бетон на 2-м этапе

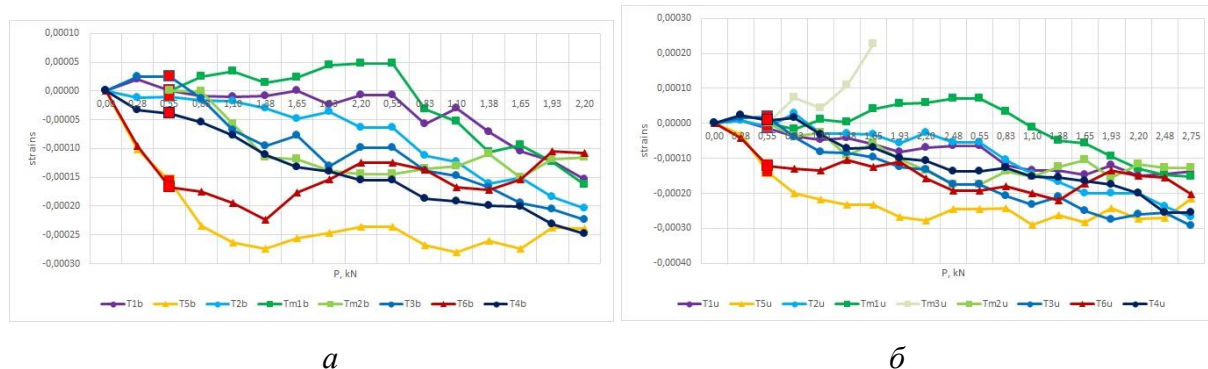
Характер деформирования ригелей экспериментальных следующий:

- на 1-ом этапе загрузки сборные части ригелей рам деформируются как изгибаемая шарнирно-опёртая однопролётная балка с возникновением деформаций растяжения в нижней и деформаций сжатия в верхних зонах. Относительные деформации сжатия в верхней зоне сборной части ригеля в середине пролёта по окончании 1-го этапа загрузки составляли 0,000121...0,000168;
- на 2-ом этапе загрузки существенно снижается интенсивность роста деформаций сжатия в верхней зоне сборной части ригеля в середине пролёта, причём в ряде



балок было отмечено даже снижение их величины. В частности, на ригелях нижнего уровня отмечалось как увеличение деформаций сжатия с 0,000156 до 0,000239 (левый ригель), так и их снижение с 0,000168 до 0,000108 (правый ригель). При этом на верхних ригелях относительные деформации сжатия верхних зон сборных частей только возрастали со значения 0,000121 до 0,000203 для левого ригеля и от 0,000139 до 0,000215 для правого ригеля. Деформации в нижней зоне сборной части ригеля на опорах также начали увеличиваться, достигая значений около краевой колонны 0,000154...0,000248, а около средней колонны – 0,000204...0,000255;

- поэтапность загрузки неразрезного ригеля на 2-ом этапе (после набора монолитным бетоном требуемой прочности) сказывается на характере деформирования монолитной части. В первоочередно загружаемом ригеле происходит рост деформаций сжатия в монолитном бетоне в середине пролёта до значений 0,000145...0,000175. При этом в смежном ненагруженном ригеле возникают растягивающие деформации (значения 0,000048...0,000071) в монолитном бетоне, что объясняется выгибом незагруженного пролёта. В последующем, после окончания загрузки всех ригелей финальные деформации в монолитном бетоне, составили 0,000115...0,000163;
- монолитный бетон на опоре испытывает деформации растяжения, которые при значении нагрузки более 1,38 кН достигают предельных значений. Примерно в это же время фиксировались трещины.



**Рис. 3.** Графики относительных деформаций сборного и монолитного бетонов элементов рам: *a* – балки нижнего яруса; *б* – балки верхнего яруса; *с* – колонны

В представленных графиках (рис. 3) относительных деформирования сборного и монолитного бетонов большой красный квадрат обозначает окончание 1-го этапа и далее деформирование конструкции в рамках 2-го этапа.

Нижние колонны начали деформироваться с первого шага загрузки, испытывая сжимающие деформации, значения которых достигло значений 0,000065...0,000075 по окончании 1-го этапа загрузки. Колонны верхнего яруса включаются в процесс деформирования после начала загрузки ригелей верхнего яруса и их деформации достигли 0,000057...0,000059 по окончании 1-го этапа загрузки.

В рамках 2-го этапа деформирования колонны нижнего яруса испытывают равномерное сжатие. Величина относительных деформаций составила 0,000226...0,000245. В колоннах верхнего яруса относительные деформации составили 0,000158...0,000169.

## ВЫВОДЫ

1. поэтапное вовлечение в процесс деформирования сборного и монолитного бетонов существенно меняет картину НДС как отдельного сборно-монолитного изгибаемого элемента, так и конструктивной системы в целом;
2. армирование монолитного бетона на опорах ригеля приводит к «превращению» серии однопролётных балок в единую многопролётную неразрезную балку, а также



повышению жёсткости узлов сопряжения ригеля с колонной и изменению конструктивной схемы в целом;

3. неравномерность загрузки сборно-монолитных ригелей приводит к выгибу незагруженных ригелей с возникновением растягивающих усилий в середине пролёта верхней зоне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Теплова Ж.С., Виноградова Н.А.* Сборно-монолитные перекрытия системы «МАРКО» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №8(35). С. 48–59. DOI: 10.18720/CUBS.35.4. <https://unstroy.spbstu.ru/en/article/2015.34.4/>.
2. *Serbin, S.A., Dedyukhin, P.O., Fomin, N.I.* The analysis of technological parameters of precast-monolithic system with permanent formwork walls. 4th International conference on safety problems of civil Engineering critical infrastructures. Safety, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/481/1/012051. <http://hdl.handle.net/10995/75421>.
3. *Шмелёв Г.Д., Фоменко Н.А., Гаврилова В.Н.* Сравнительный анализ современных систем возведения зданий гражданского назначения // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2018. №3(6). С. 9–19. [https://zhkh.cchgeu.ru/?page\\_id=216&lang=en](https://zhkh.cchgeu.ru/?page_id=216&lang=en).
4. *Опбул Э.К.* Перспективные конструктивные решения сборно-монолитного перекрытия из фиброжелезобетона // Вестник гражданских инженеров. 2014. №5(46). С. 33–38. <http://vestnik.spbgasu.ru/magazine-issue/no-6-47-dekabr-2014-vestnik-grazhdanskih-inzhenerov>.
5. *Koyankin, A., Mitasov, V.* Assessment of structural reliability of precast concrete buildings. MATEC Web of Conferences. IV International Young Researchers Conference «Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects» (YSSIP-2017). Volume 143, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814301001>.
6. *Koyankin, A.A., Mitasov, V.M.* Stress-strain state of precast and cast-in place buildings. Magazine of Civil Engineering. 2017. 6(74). Pp. 175–184. DOI: 10.18720/MCE.74.14.
7. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Каркас сборно-монолитного здания и особенности его работы на разных жизненных циклах // Вестник МГСУ. 2015. №9. С. 28–35. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.4.175-180. <http://vestnikmgsu.ru/en/component/sjarchive/issue/article.display/2012/4/175-180>.
8. *Смоляго Г.А., Крючков А.А., Дронова А.В., Дрокин С.В.* Результаты экспериментальных исследований несущей способности, трещиностойкости и деформативности сборно-монолитных и монолитных перекрытий // Известия Юго-западного государственного университета. 2011. №5(38)-2. С. 105–109. [https://swsu.ru/izvestiya/journal/5-2\\_38\\_2011.pdf](https://swsu.ru/izvestiya/journal/5-2_38_2011.pdf).
9. *Ватин Н.И., Величкин В.З., Козинец Г.Л., Корсун В.И., Рыбаков В.А., Жувак О.В.* Технология сборно-монолитных балочных железобетонных перекрытий с керамзитобетонными блоками // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. №7(70). С. 43–59. DOI: 10.18720/CUBS.70.4. <https://unstroy.spbstu.ru/en/article/2018.70.4/>.
10. *Афанасьев А.А.* Технологии возведения сборно-монолитных каркасных зданий при отрицательных температурах // Вестник МГСУ. 2012. №4. С. 175–180. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.4.175-180. <http://vestnikmgsu.ru/en/component/sjarchive/issue/article.display/2012/4/175-180>.

# ФОРМЫ САМОНАПРЯЖЕНИЯ БАЛОК НА КРИТИЧЕСКИХ УРОВНЯХ ЭНЕРГИИ

Л.Ю. Ступишин<sup>1</sup>, М.Л. Мошкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>ФГБОУ «Юго-Западный государственный университет»,

<sup>1</sup>luscgsh@yandex.ru

<sup>2</sup>mmoshkevich@yandex.ru

## Аннотация

Модель изгибаемой балки представляет собой хорошо изученную проблему с устоявшимися представлениями о ее разработке, допущениях и получаемых результатах. Модель С.П. Тимошенко, содержащаяся в учебниках по сопротивлению материалов, по - прежнему подлежит развитию и уточнению, и представляет интерес для многих авторов. В статье предлагается новый вариант уравнения оси изогнутой балки Тимошенко, позволяющий рассматривать состояния самонапряжения балки на критических уровнях внутренней потенциальной энергии деформации.

Выведенное уравнение отличается от точного уравнения кривизны оси простотой и дает возможность в отличие от приближенного уравнения, которое используется при классическом рассмотрении недеформируемой схемы балки, решать задачи в геометрически нелинейной постановке.

Несмотря на то, что вывод уравнения исходит из рассмотрения точного уравнения кривизны линии, известного из математики, конечный вид уравнения коррелируется с результатами, полученными для уравнений критического состояния конструкций с распределенными и сосредоточенными параметрами, полученными из самых общих соображений.

Приводятся формы кривых изгиба для состояния самонапряжения балок, и результаты решения задач для статически неопределимой балки, а также некоторые геометрические соотношения.

**Ключевые слова:** изгиб балок, модель Тимошенко, самонапряжение, критические уровни энергии

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы построения физических и математических моделей деформируемых конструкций остаются актуальными на протяжении всего периода существования наук о прочности материалов и конструкций. Исходные гипотезы, допущения и представления о работе элементов конструкций являются ключевыми как для получаемых результатов, так и для развития аналитических и численных методов исследования сформулированных моделей.

Примером могут служить подходы, основанные на принятии допущения о недеформируемости исходной расчетной схемы балки, которые не позволяют получить не только величины прогибов в нелинейной стадии деформирования, но и объяснить факты, связанные с явлением потери устойчивости плоской формы изгиба.

Несмотря на хорошую изученность модели балки Тимошенко, активно продолжаются исследования, уточняющие исходную модель и расширяющие возможности ее использования в задачах динамики, композитных конструкций [1,2] а также в других приложениях [3,4].

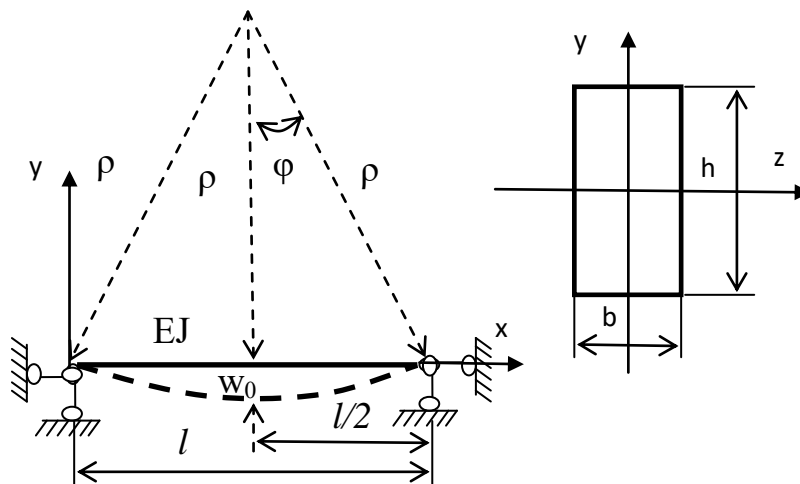
Основным недостатком предложенной модели можно считать невозможность распространения получаемых результатов на ее поведение в нелинейной стадии деформирования. Существует большое количество численных подходов, позволяющих получить удовлетворительные результаты, из ряда которых мы выделим исследования

Л.Г. Доннела, позволяющие получить хорошо обозримую процедуру решения задачи изгиба в тригонометрических рядах [5]. Однако гипотезу прочности балки, расчетчик будет выбирать, сообразуясь со своими представлениями, которые никак не связаны ни с выбранной моделью изгиба, ни с кривой состояния равновесий конструкции, ни с изменением деформаций по высоте балки. Если на кривой состояния равновесия назначить точку, например, появления пластических деформаций в фибровых волокнах, а затем считать, что пластические деформации последовательно распространяются до нейтральной оси балки, получим теорию предельного равновесия в пластической стадии деформирования балки. Известно, что теория потери прочности балкой в упругой и пластической стадиях деформирования, дают прямо противоположные результаты подбора поперечных сечений. Это следствие того, что гипотезы прочности и гипотезы о равновесном состоянии конструкции никак не связаны между собой.

Теория критических уровней потенциальной энергии деформации конструкции исходит из того, что на критических уровнях происходит изменение состояния самонапряжения (самоуравновешенности) конструкции [6]. Вследствие чего меняется вид кривой равновесных состояний конструкции, вследствие выхода из работы на нагрузку некоторых связей или меняется расчетная схема конструкции. Вариационный критерий критических уровней приводит математическую модель задачи к задаче на собственные значения. Такая модель используется для исследования задач бифуркации состояний, например, задач устойчивости балок. Логично предположить, что потеря прочности балкой, тоже является задачей бифуркационного типа, и должна иметь исходное уравнение, позволяющее исследовать это явление [7]. Статья посвящена выводу уравнения изгиба балки, позволяющему расширить наши представления о потере прочности балкой, как бифуркационном процессе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим балку, которая в процессе деформирования достигла критического уровня энергии (см. рисунок 1). Поскольку расчет ведется по деформированной схеме, балка статически неопределима, а внешняя нагрузка считается нулевой.



**Рис. 1.** Балка на критическом уровне энергии

Поперечное сечение будем считать постоянным по длине пролета и имеющим хотя бы одну ось симметрии.

Точное дифференциальное уравнение задачи изгиба балки имеет вид

$$\frac{1}{\rho} = \frac{w''}{\left(\sqrt{1+w'^2}\right)^3}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  - радиус кривизны балки,  $w$  - прогибы балки. Штрих означает первую производную по координате  $x$ . Преобразуем правую часть выражения (1), считая кривизну балки, стоящую в левой части уравнения постоянной величиной, поскольку балка находится на критическом уровне энергии

$$\frac{1}{\rho} = k \quad (2)$$

После несложных преобразований получаем уравнение

$$\frac{1}{3k^2} w''' = w' + 2w'^3 + w'^5.$$

В правой части располагаются слагаемые разных порядков. Учитывая, что величина  $w'$ , имеющая физический смысл тангенса угла поворота поперечного сечения изгибаемой балки, для большинства задач строительной механики много меньше единицы, и отождествляется с самим углом, можем пренебречь величинами второго и третьего слагаемых по сравнению с первым.

Проинтегрировав полученное выражение один раз, с точностью до произвольной постоянной, получим уравнение предельного состояния изгибаемой балки в виде

$$w'' - 3k^2 w = 0. \quad (3)$$

Мы имеем приближенное уравнение изгиба балки, которое будет давать хорошие результаты для балок большой и средней жесткости, которые, в основном, используются в практике строительства.

В отличие от классического дифференциального уравнения оси изогнутой балки постоянной вдоль пролета толщины

$$EJw^{IV} = 0, \quad (4)$$

уравнение (3) бифуркационного типа, которое позволяет утверждать, что в предельном состоянии (на критических уровнях энергии) задача изгиба имеет точки ветвления кривой равновесных состояний. Это уравнение полезно тем, что места ветвлений решения схватываются точно, как показано в [8]. Таким образом, величины критических усилий, являющиеся собственными значениями задачи, будут получены точно, чего нельзя сказать о величинах прогибов балки, которые описываются нормированными собственными функциями.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение уравнения (3) хорошо известно [9], и в отдельных случаях для собственных значений и собственных функций существуют явные решения для некоторых типов граничных условий.

$$w = C_1 \operatorname{ch}(x\sqrt{|3k^2|}) + C_2 \operatorname{sh}(x\sqrt{|3k^2|}). \quad (5)$$

Например, в случае свободно опертой балки с граничными условиями  $w(a) = w(b) = 0$  имеем собственные значения

$$3k^2 = \frac{n^2 \pi^2}{l^2}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Нормированные собственные функции имеют вид

$$\phi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin(n\pi \frac{x}{l}). \quad (7)$$

Легко проверить, что собственные функции удовлетворяют и граничным условиям вида  $w''(a) = w''(b) = 0$

С точки зрения критических уровней энергии собственные моды изгиба балки показывают, что какой бы ни была нагрузка, на критических уровнях энергии форма оси изогнутой балки описывается только собственными модами уравнения(3).

## ВЫВОДЫ

Приведена новая форма уравнения изгиба балки, учитывающая возможность бифуркационного поведения при потере прочности.

Потеря прочности балкой сопровождается изменением форм самонапряжения, характеризующих возможные самоуравновешенные состояния балки при потере прочности.

Формы самонапряжения являются решением задачи на собственные значения для заданной балки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zare M., Asnafi A. Nonlinear pre and post-buckled analysis of curved beams using differential quadrature element method// Zare and Asnafi International Journal of Mechanical and Materials Engineering (2019) 14:15 <https://doi.org/10.1186/s40712-019-0114-5>
2. Yuquan Wang Improved Strategy of Two-Node Curved Beam Element Based on the Same Beam's Nodes Information// Advances in Materials Science and Engineering Volume 2021, Article ID 2093096, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2021/2093096>
3. Feng Yue A Refined Model for Analysis of Beams on Two-Parameter Foundations by Iterative Method// Mathematical Problems in Engineering Volume 2021, Article ID 5562212, 11 pages <https://doi.org/10.1155/2021/5562212>
4. Shiyong Jiang , Weilai Yao, Jin Chen, Tao Cai. Finite Element Modeling of FRP-Strengthened RC Beam under Sustained Load// Advances in Materials Science and Engineering Volume 2018, Article ID 7259424, 16 pages <https://doi.org/10.1155/2018/7259424>
5. Доннел Л.Г. Балки, пластины, оболочки. М.: Наука, 1982. 568с.
6. Ржаницын А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. Москва: Гостехиздат. 1955. с 475
7. Ступишин Л.Ю. Критические уровни внутренней потенциальной энергии деформации твердых деформируемых тел: монография / Л.Ю. Ступишин; Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, г. Москва, 2022. - 387 с. DOI 10.47581/2022/Stupushin.01
8. Коллатц Л. Задачи на собственные значения с техническими приложениями. М: Наука, 1968. 503 с.
9. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям/ М.:Наука, 1971. – 576 с.

## **К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ИЗ ТРУБ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СООРУЖЕНИЙ ТОННЕЛЬНОГО ТИПА**

**И.А. Самсонов<sup>1</sup>, В.В. Василевский<sup>2</sup>, И.М. Юдина<sup>3</sup>**

*<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,*

*samsonow.v@mail.ru*

*vladislavvasilevsky2000@mail.ru*

*YudinaIM@mail.mgsu.ru*

### **Аннотация**

В данной статье рассматриваются особенности создания горизонтальных защитных экранов из стальных труб для строительства сооружений тоннельного типа закрытым способом. Анализируются типы и методы устройства горизонтальных защитных экранов. Учитываются факторы, влияющие на выбор рациональной формы экрана и, соответствующей расчетной схемы для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии массива грунта ослабленного горизонтальной полостью закрытого типа с учетом различных вариантов опирания крепи и внешнего воздействия на исследуемый массив.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В современных условиях плотной городской застройки, сочетающей в себе как здания промышленного и жилого назначения, так и сооружения инженерной и транспортной инфраструктуры, часто возникает необходимость создания подземных сооружений [1]. Как правило, невозможность строительства таких сооружений «открытым способом», а также сглаживание возникающих последствий, связанных с деформацией грунтового массива, является технически непростым и трудоемким процессом. На сегодняшний день для решения данных задач применяется технология создания горизонтальных защитных экранов из труб [2]. Важным преимуществом данной технологии является возможность ведения строительных работ с учетом геологических условий участка строительства разной сложности.

Технология возведения тоннелей с использованием защитных экранов из труб заключается в формировании экрана по контуру прохода. После устройства защитного экрана осуществляется проходка тоннеля с возведением постоянной несущей конструкции обделки тоннеля. За счет подземного ведения работ, появляется возможность обойтись без изменения ландшафта местности, демонтажа и переноса отдельных элементов, остановки движения транспорта, тем самым сводя к минимуму негативное влияние от строительства на городскую систему.

Объектами строительства являются пешеходные переходы, станции метрополитена, а также тоннели под автодорожными и железнодорожными магистральями.

### **КОНСТРУКЦИИ И СПОСОБЫ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТРУБ**

В состав защитного экрана входят стальные трубы и поддерживающие элементы. Диаметры стальных труб при устройстве горизонтальных защитных экранов варьируются от 325 мм до 1220 мм. Толщина стенок труб изменяется в зависимости от несущей способности конструкции. Самое широкое применение имеют защитные экраны из стальных труб, армированные стальными каркасами и заполненные бетоном. Примеры конструкций защитных экранов показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Горизонтальные защитные экраны из стальных труб различной формы

В качестве поддерживающих элементов, как правило, используют стальные и омоноличенные бетоном арки с анкерами и монолитные или сборные железобетонные обделки.

По методам обустройства различают защитные экраны, устраиваемые следующими способами: прокол, бурошпек, микротоннелирование и щитовая проходка.

Для сооружения защитного экрана необходимо устройство вспомогательного котлована, в котором размещается все технологическое оборудование.

При строительстве тоннелей малой протяженности, трубы экрана продавливаются по всей длине, а их торцы с обеих сторон жестко заделываются в припортальные стальные рамы. Данный метод позволяет возводить тоннели протяженностью до 100 м.

## **РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА**

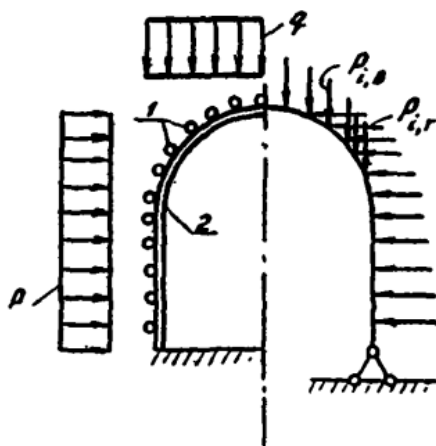
Для расчета параметров экрана, при условии, что в грунтовом массиве вокруг выработки не образуется обширная зона пластических деформаций, рекомендуется использовать методику расчета на основе программирования, учитывающую совместное деформирование элементов системы "крепь - грунт".

При возникновении в грунтовом массиве зон пластических деформаций, защитный экран из труб рассчитывают на заданные нагрузки от веса грунта нарушенной зоны, при этом следует использовать методику расчета, основанную на анализе работы элементов защитного экрана с учетом их взаимного влияния [5].

Значения усилий, которые воспринимает защитный экран, определяются опытным путем или в предположении сводообразования в безотпорной зоне, в соответствии с [6].

Выбор статической схемы расчета трубы экрана производится с учетом технологической последовательности разработки штольни, а также от вида опирания трубы на поддерживающий элемент. Так, в зависимости от способа опирания, выполняется расчет максимального изгибающего момента в трубе и несущей способности (по моменту) стальной трубы, заполненной бетоном или железобетоном. Для учета деформаций поддерживающих элементов вводится коэффициент упругой податливости опирания труб  $\delta_i$ , зависящий от смещения поддерживающего элемента и усилия в месте опирания трубы. От этого коэффициента зависит расстояния между осями труб.

Необходимо учитывать деформацию грунта  $\delta_{гр,i}$  под пятнами опирающегося на него поддерживающего элемента. А деформации прокладок  $\delta_n$ , располагаемых между арками и трубами, необходимо учесть при расчете податливости опирания труб на металлические арки. Статическая схема расчета поддерживающего элемента представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Статическая схема расчета поддерживающего элемента

Суммарная величина коэффициента упругой податливости опирания трубы на поддерживающий элемент  $\delta_{оп}$  определяется с помощью выражения:

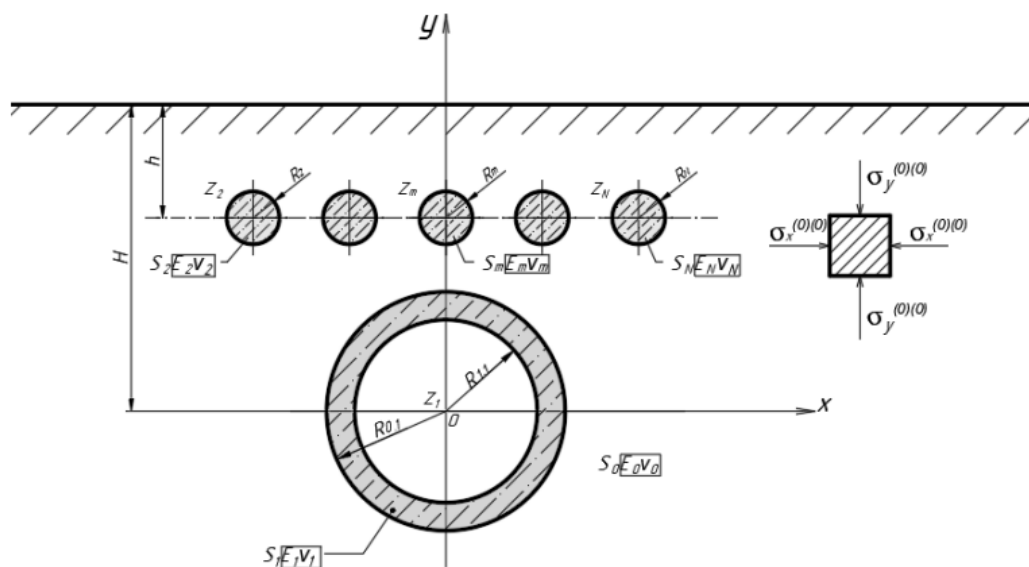
$$\delta_{оп} = \delta_i + \delta_{гр,i} + \delta_n,$$

где  $\delta_i$  – коэффициент упругой податливости опирания труб;

$\delta_{гр,i}$  – деформация грунта под пятнами поддерживающего элемента;

$\delta_n$  – деформации поддерживающих прокладок, устанавливаемых между трубами и арками.

Метод комплексных потенциалов Колосова-Мусхелишвили - это аналитический метод, позволяющий рассчитывать защитные экраны из труб [7]. Расчетная схема для аналитического метода решения представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Расчетная схема плоской задачи теории упругости

Данный метод имеет ряд плюсов и ограничений. Плюсы данного метода заключаются в его универсальности, так как полученное решение можно использовать для различных параметров и глубины заложения труб защитного экрана и постоянной несущей конструкции тоннеля. Однако решения получены в упругой постановке и для подземных сооружений замкнутой круглой формы.



## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ С ЗАЩИТНЫМ ЭКРАНОМ ИЗ ТРУБ

Используя современные численные программные комплексы, такие как Midas, возможно моделировать поведение грунтового основания, при различных видах его работы, не прибегая к упрощенной расчетной схеме.

Такой подход позволяет учесть многие факторы, такие как - геологические условия любой сложности; устойчивость откосов; уровень грунтовых вод, изменяющийся во времени; влияние динамических воздействий. Решение задачи в комплексе приводит к получению более достоверных результатов расчета.

Рассмотрим пример расчета, выполненный для прогноза влияния устройства автодорожного тоннеля на пересечении ул. Рябиновая и МЖД Киевского направления на напряженно-деформированное состояние массива грунта. Расчеты велись в программном комплексе Midas. Поперечный разрез конструкции тоннеля и общий вид модели представлены на рис. 4 и рис. 5.

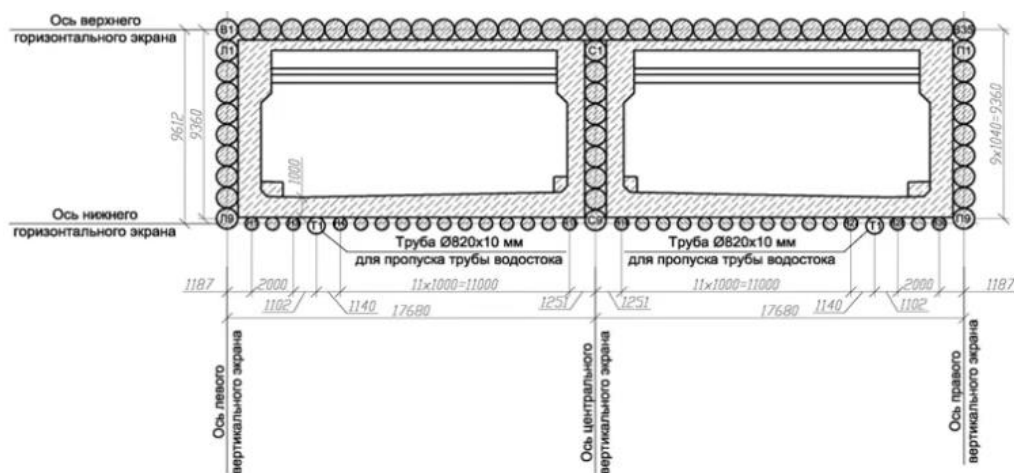


Рис. 4. Поперечный разрез конструкции

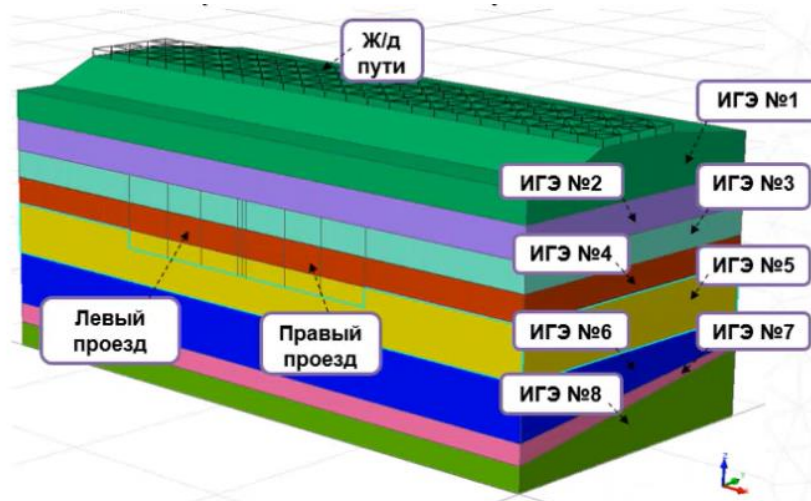
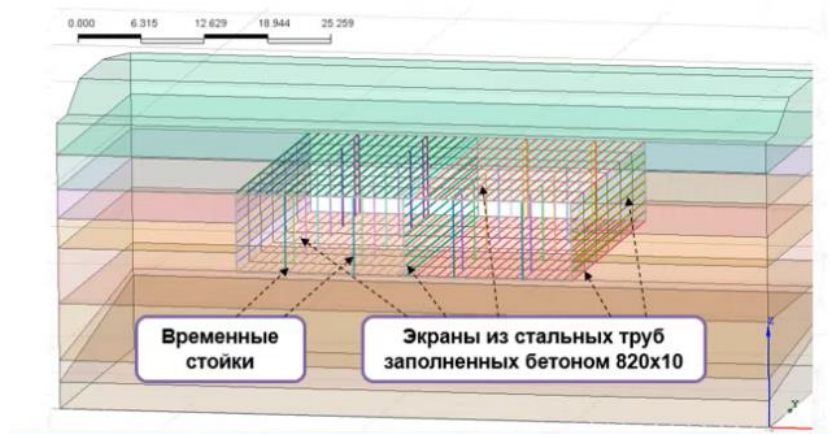


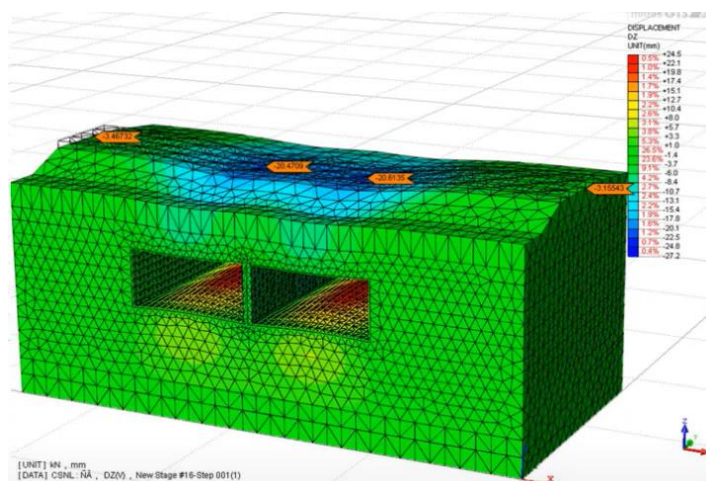
Рис. 5. Общий вид модели с учетом геологических условий

После устройства стартового и приемного котлованов, выполняется сооружение защитного экрана из труб по периметру тоннеля. В данной расчетной схеме, трубы защитного экрана представлены стержневыми элементами (рис.6).



**Рис. 6.** Модель защитного экран из стальных труб

На основании выполненных расчетов, учитывающих динамические нагрузки от железнодорожных путей, была получена осадка дневной поверхности земли - 20,6 мм. Полученная осадка не учитывает дополнительные осадки, зависящие от технологии устройства защитного экрана. Деформированная расчетная схема представлена на рис. 7.



**Рис. 7.** Деформированная расчетная схема

## ВЫВОДЫ

В данной статье рассмотрены конструкции и методы устройства горизонтальных защитных экранов из стальных труб, проведен анализ методик расчета элементов защитного экрана, учитывающих их взаимное влияние, деформируемость грунта в призабойной зоне, технологическую последовательность разработки забоя. Представлен пример расчета защитных экранов из стальных труб, выполненный с помощью современного программного комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов/ Под ред. *Ильичева В.А.* – М.: ГУП НИИАЦ, 2004. – 206 с.3.
2. *Храпов, В.Г.* Тоннели и метрополитены: учебник для вузов / *В.Г. Храпов, Е.А. Демешко, С.Н. Наумов;* ред. *В.Г. Храпов.* – М.: Транспорт, 1989. – 383 с.
3. *Маковский Л.В.* Современные технологии проходки в сложных инженерно-геологических условиях. – М.: Метро и тоннели, 2002. №5.-С.21.
4. Рекомендации по применению опережающих экранов из труб при сооружении транспортных тоннелей/ Под ред. *Букова Н. Э., Матрохина Г.С.* - М.: ЦНИИС, 1988. – 47 с.
5. Методические рекомендации по расчету временной крепи тоннельных выработок. М., ЦНИИС, 1984 г.
6. СП 122.13330.2012. Тоннели железнодорожные и автодорожные. – М.: Минрегион России, 2012. – 112 с.
7. *Мухелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. – 707 с.

## СЕГМЕНТЫ ПОЛИГОНАЛЬНОЙ АРКИ

А.С. Торлин<sup>1</sup>, А.М. Ибрагимов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>Andrey.Torlin@inbox.ru

<sup>2</sup>igasu\_alex@mail.ru

### Аннотация

В данной статье приводится исследование, показывающее как меняется характер и значение эпюр изгибающих моментов, поперечных и продольных сил, в процессе трансформации балки в арку. Основываясь на данных, полученных в результате исследования, будет сделан вывод о рациональности использования арки и ее преимуществах перед балкой. Также приводится сравнительный анализ, показывающий на сколько процентов, меняется значение в одинаковых эпюрах, но при разном приближении балки к арке. Опытным путем определяется минимальное четное число прямолинейных сегментов  $n$ , на которое можно разделить арку пролетом 10 м и высотой подъема 3.6 м. для того, чтобы различие между каждым последующим приближением  $n+2$  было не более 15%.

### ВВЕДЕНИЕ

Арка является одним из древнейших видов строительных сооружений, первое упоминание арок встречается в истории Этрусков еще за долго до нашей эры. Известны не просто дошедшие до наших дней, но и не потерявшие своего прямого предназначения, арочные мосты, например мост через реку Мелес в Измире (бывшая Смирна) в Турции, дата постройки этого моста примерно 850 г. до нашей эры, или мост через реку Тибр в Риме дата постройки примерно 62 год до нашей эры. Также известны римские акведуки, некоторые из них, такие, например, как Пон-дю-Гар, построенный в середине первого века нашей эры, сохранились до наших дней. Что общего между всеми этими сооружениями и в чем секрет их долголетия, и безотказной работы, безусловно величайший талант древних строителей, а также то, что все эти сооружения представляют собой в той или иной степени арки. Еще древние строители заметили, что форма арки позволяет перераспределять вес вышележащих конструкций на камни, образующие арочный свод таким образом, чтобы эти камни испытывали только силу сжатия. Благодаря своим уникальным свойствам арки не потеряли свою актуальность и в настоящее время.

Актуальность данного исследования заключается в том, что арку полигонального очертания [1] изготовить значительно проще, так как для ее изготовления, в отличие от изогнутой арки, используются прямолинейные элементы [2]. Для сохранения свойств гнутой арки в полигональном исполнении необходимо знать минимальное количество сегментов  $n$ , на которое можно разбить дугу, чтобы получившиеся в результате разбиения конструкция обладала свойствами, сопоставимыми со свойствами круговой арки. Зная минимальное число  $n$ , можно затем найти и оптимальное для решения конкретной задачи.

Так как технология изготовления прямолинейных сегментов [3] полигональной арки не требует специальных станков и оборудования, достаточно обычного ручного сварочного инструмента и кондуктора матрицы для выставления взаимного угла поворота, такие сегменты можно изготавливать в мастерских прямо на строительной площадке.

Технология изготовления криволинейных профилей значительно более сложная, так как предполагает наличие специальных прокатных станков, вспомогательного оборудования и высококвалифицированных специалистов. Такой технологический

процесс возможен только в заводских условиях. Сложность, масштаб и стоимость оборудования повышают стоимость конечного изделия.

Наиболее рациональной формой очертания арки для восприятия равномерно распределенной нагрузки является парабола [4], однако в нашем случае используется более компромиссная форма арки кругового очертания [5]. Преимущество круговой формы перед параболической заключается в том, что сегменты арки получаются всегда одинаковые, унифицированные, что удешевляет их изготовление и упрощает монтаж конструкции, а также делает все элементы арки взаимозаменяемыми.

### РЕШЕНИЕ

Для решения поставленной задачи построим эпюры изгибающих моментов и поперечных сил для балки Рис.1., закрепленной на неподвижных шарнирных опорах, пролетом 10 м, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q = 100 \text{ кг/м}$ .

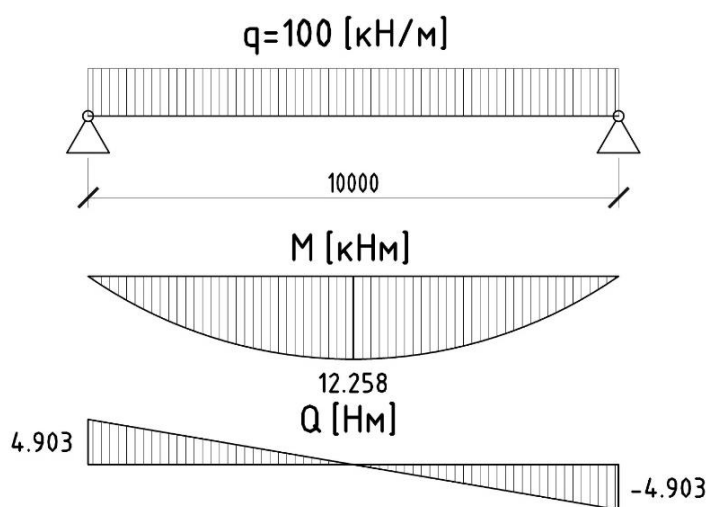


Рис. 1.

Для удобства восприятия и анализа информации, запишем получившиеся в результате расчета данные в таблицу 1.

По такому же принципу построим эпюры для остальных конструкций с числом сегментов  $n=2,4,6,8,10$ . Рис.2, получившиеся результаты также занесем в таблицу в таблицу 1.

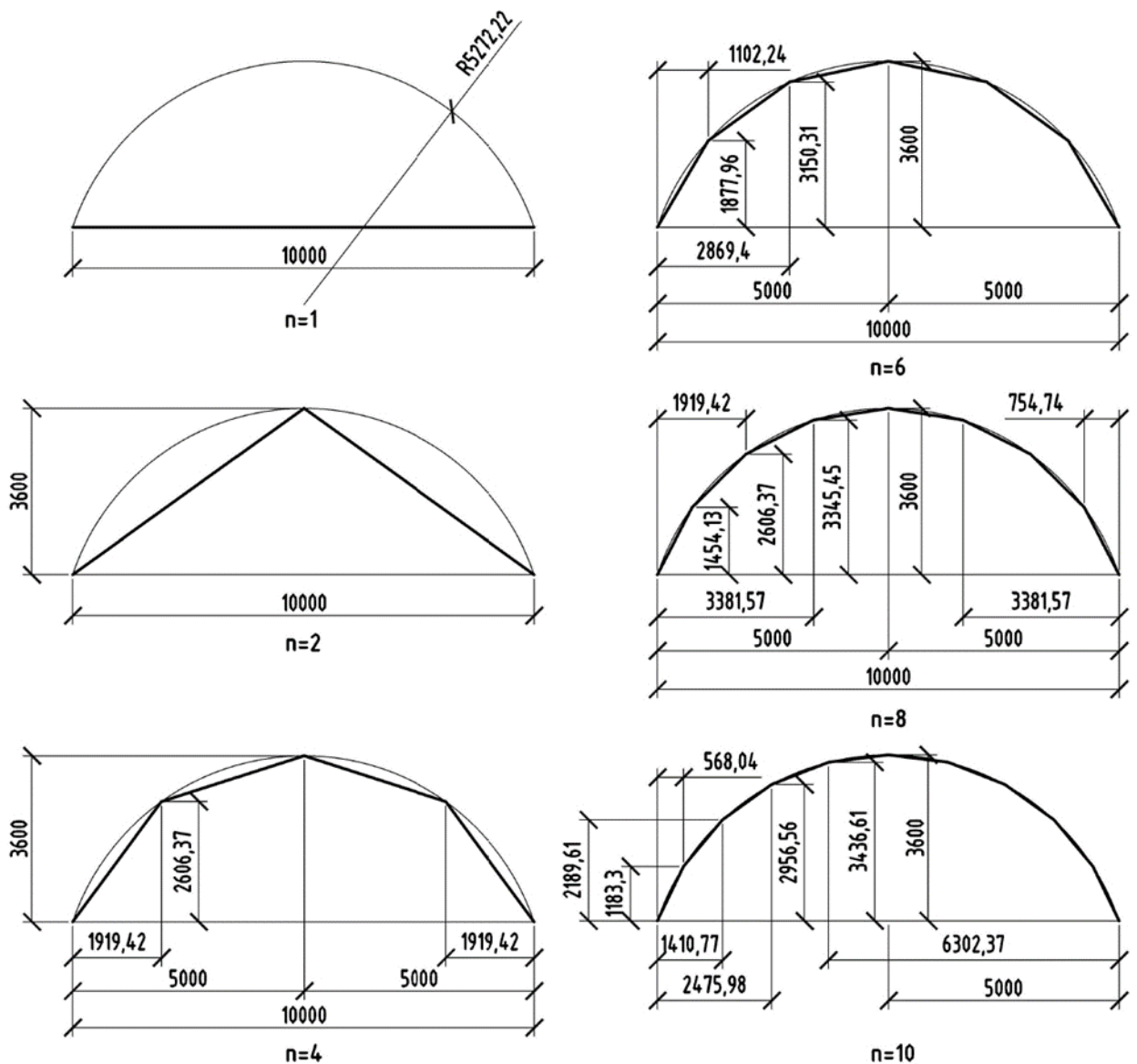
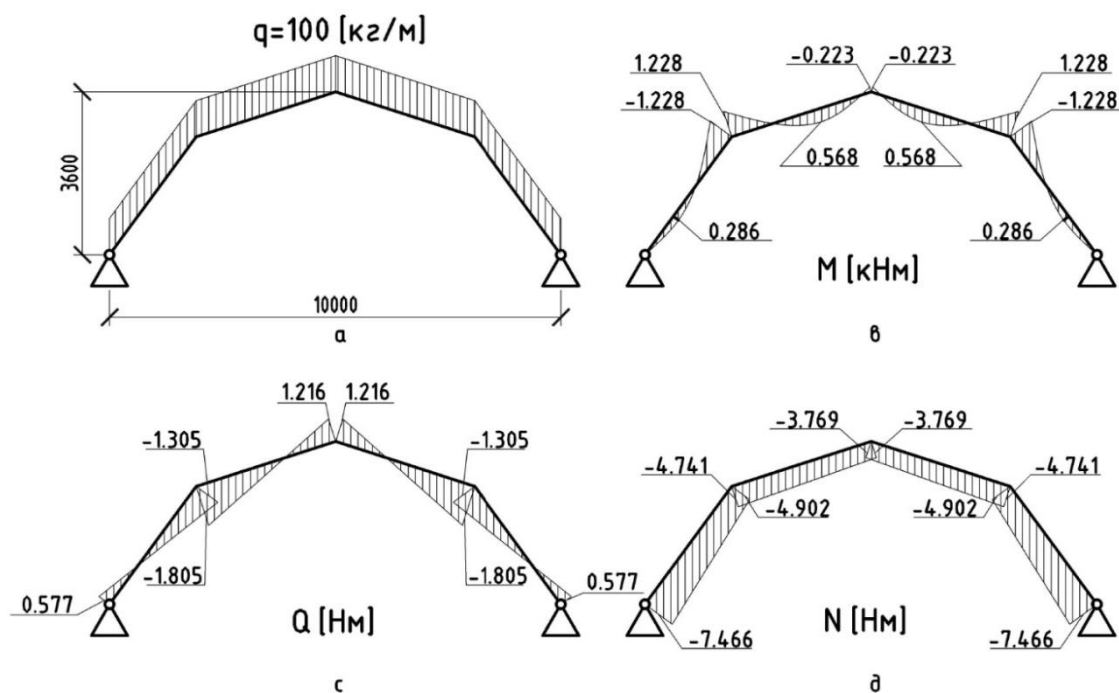


Рис. 2.


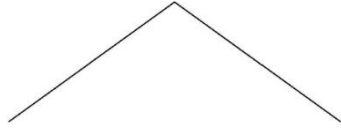
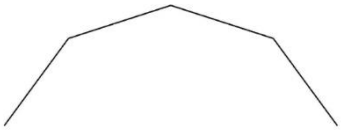
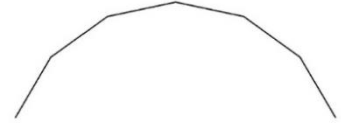

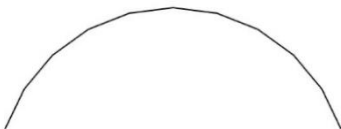
Для визуализации характера эпюр и наглядности результатов расчета приведем эпюры изгибающих моментов  $M$ , поперечных  $Q$  и продольных  $N$  сил для двух шарнирной, равномерно загруженной нагрузкой  $q = 100$  кг/м арки, состоящей из 4 сегментов Рис.3. Такое количество сегментов выбрано не случайно, так как характер эпюр с увеличением сегментов не меняется, меняются только экстремумы.



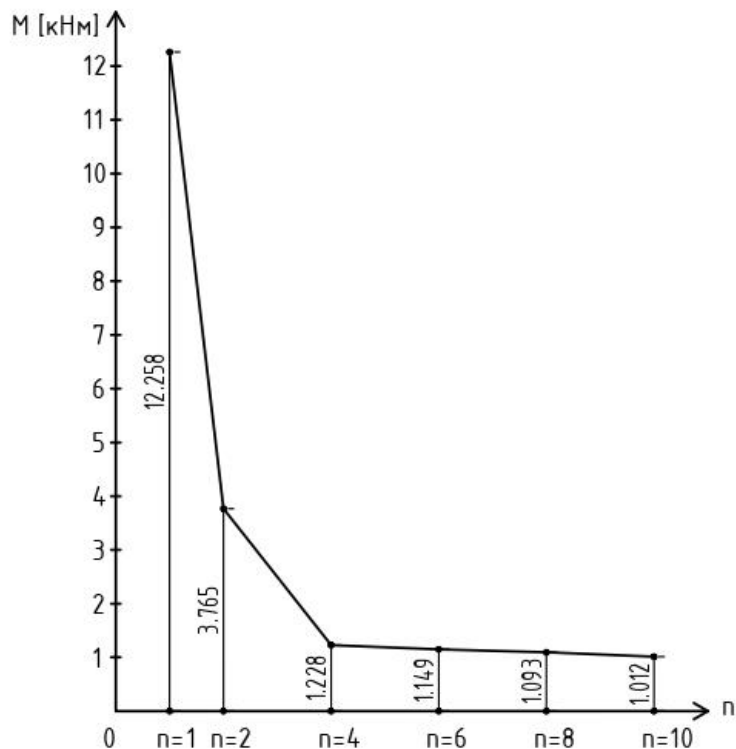
**Рис. 3.**

Эпюра продольных сил Рис.3. д. однозначно показывает, что при равномерно распределенной нагрузке, в арке возникают только сжимающие силы, что важно при изготовлении арок из различного рода природных и искусственно созданных каменных материалов, таких, например, как керамический или силикатный кирпич, железобетон и т.д., так как каменные материалы примерно в 10 раз хуже воспринимают нагрузку на растяжение чем на сжатие [6].

Таблица 1.

Число сегментов $n$	Форма конструкции	Изгибающий момент максимальный по модулю. $M$ [кНм]	Поперечная сила максимальная по модулю $Q$ [кН]	Продольная сила $N$ [кН]
1		12,258	4,903	-
2		3,765	3,063	-7,784
4		1,228	1,827	-7,466
6		1,149	1,316	-7,421
8		1,093	1,212	-7.395
10		1,012	1,066	-7,375

Для визуализации результатов таблицы построим график изгибающих моментов  $M$ , поперечных  $Q$  и продольных сил  $N$  [7] Рис.4. Графическое представление данных хорошо показывает, как меняется изгибающий момент в зависимости от количества сегментов, чем сегментов арки больше, тем изгибающий момент меньше.



**Рис. 4.**

График, изображенный на рисунке 4 показывает, что для балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, характерен самый большой изгибающий момент из всех представленных для анализа конструкций, что однозначно делает ее самой нерациональной, с точки зрения экономии материала, конструкцией для перекрытия пролета в 10 метров. Добавив строительный подъем, и превратив балку (Рис.2.,  $n = 1$ ) в треугольную арку (Рис.2.,  $n = 2$ ), мы видим снижение изгибающего момента при той же нагрузке, практически, на 70 %.

Если продолжить приведение треугольной арки к форме дуги окружности, и ввести еще по одному сегменту с каждой стороны так, чтобы в общей сложности их стало 4 (Рис. 2.  $n = 4$ ), то мы получим снижение изгибающего момента, по сравнению с балкой, практически, на 90%. Дельта изменения изгибающего момента между конструкциями  $n=2$  и  $n=4$  составит 67%. Однако, при дальнейшем увеличении числа сегментов, такого результата уже не наблюдается. Дельта между конструкциями  $n = 4$  и  $n = 6$ ,  $n = 6$  и  $n = 8$ ,  $n = 8$  и  $n = 10$  колеблется в диапазоне от 4.5% до 7.5%.

Рассмотрим график продольных сил Рис. 5. Обратим внимание, что на нем отсутствует балка, так как в ней, при равномерно распределенной нагрузке, не возникает продольных сил. Также обратим внимание, что дельта между максимальными значениями всех остальных конструкций не так велика, как в предыдущем графике. Например, в графике изгибающих моментов между конструкциями  $n = 2$  и  $n = 4$  разница значений составила 67%. На графике продольных сил, дельта изменения между конструкциями с  $n=2$  и  $n=4$  составила 4.1%, а дельта изменения между конструкциями  $n = 4$  и  $n = 6$ ,  $n = 6$  и  $n = 8$ ,  $n = 8$  и  $n = 10$  колеблется в диапазоне от 0.3% до 0.6%.



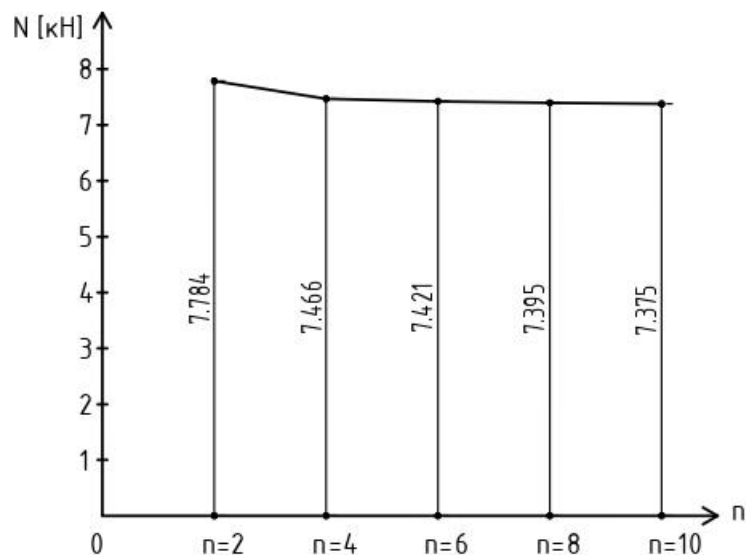


Рис. 5.

Рассмотрим график поперечных сил, Рис. 6. На данном графике мы видим общую для всех графиков тенденцию по снижению главного показателя, в данном случае поперечной силы  $Q$ , в зависимости от увеличения числа сегментов. Однако график выходит на разницу в 15%, в отличие от предыдущих графиков, только после  $n \geq 6$  сегментов.

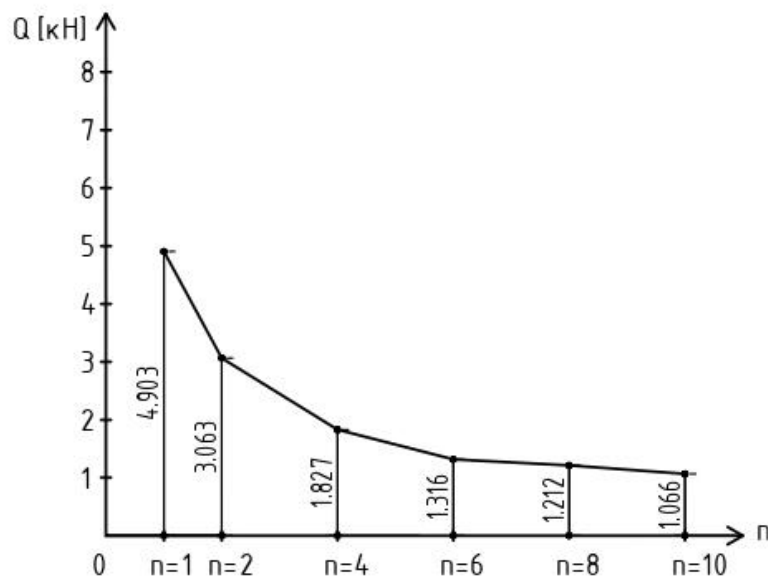


Рис. 6.

## ВЫВОД

В результате проведенного исследования мы можем однозначно сказать, что наиболее оптимальной формой для перекрытия пролета в 10 метров при одинаковой нагрузке является арка, причем, чем больше она содержит сегментов, тем большее значение в условии ее прочности начинает играть продольная сила  $N$ .

Также, в результате наблюдения за эпюрами  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  было выведено минимальное число сегментов  $n=6$  для пролета в 10 м., при увеличении которого, действующие в арочной конструкции изгибающие моменты, поперечная и продольная силы, изменялись бы в пределах не более 15%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н.* Металлические конструкции // Под ред. Н.С. Стрелецкого. Москва. Стройиздат. 1961. С. 612-629.
2. *А. М. Ибрагимов, А. С. Торлин.* Стальная сквозная арочная конструкция с предварительно напряженным нижним поясом и решеткой // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2021.
3. *Горев В.В., Аржаков В.Г., Бабкин В.И., Енджиевский Л.В., Зверев В.В., Казарновский В.С.* Металлические конструкции. В 3 т. Т.3.
4. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. Москва. АСТ. 2008. - 992 с.
5. *Шагивалеев, К. Ф.* Расчет круговой арки на вертикальную сосредоточенную нагрузку // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2020. – № 5(44). – С. 372-374.
6. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. - М.: Минрегион России, 2012.128 с.
7. *Анохин Н. Н.* Строительная механика в примерах и задачах. Ч. II. Статически не определимые системы: Учеб. Пос.-М.: Изд-во АСВ, 1999.-335с.

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЕЕДЕРЕВЯННОЙ БАЛКИ

В.П. Ярцев<sup>1</sup>, В.М. Данилов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5,

<sup>1</sup>jarcev21@rambler.ru

<sup>2</sup>vm.danilov1997@gmail.com

## Аннотация

Ввиду массового развития технологий строительства и проектирования по каркасно-панельной конструктивной схеме в сфере малоэтажного строительства, изучение эксплуатационных параметров клеедеревянных конструкций является актуальной задачей. Во многих развитых странах мира использование клееных деревянных конструкций является устоявшейся практикой. В статье приведены методы проведения экспериментов на определение внутренних напряжений и прогибов балки из клееной древесины при изгибе. Рассмотрены деформационные характеристики клеедеревянной балки при различных температурах окружающей среды. Приведены графики изменений напряжений в каждом слое клеедеревянной балки. Эксперименты показали, что балка из клееной древесины показывает достаточную прочность и сопротивление деформациям при нормальных эксплуатационных параметрах. При высоких температурах наблюдается разрушение по клеевому шву, а также скалывание древесины.

## ВВЕДЕНИЕ

На данный момент для массового малоэтажного строительства является перспективной каркасно-панельная конструктивная схема с применением клееных элементов. Такие здания являются энергоэффективными и экологичными, а также в достаточной степени экономичными [1, 2]. Также стоит отметить, что клееные конструкции применяют в строительстве малоэтажных промышленных и сельскохозяйственных зданий, а также складов, административно-бытовых и других подобных сооружений. Древесина при этом не лишена различных природных пороков, которые устраняются путем вырезания или отпиливания дефектных мест. Получившиеся маломерные доски практически бесполезны в обычном строительстве, но полезны для создания клееных конструкций, что в свою очередь снижает отходы пиломатериалов [3-5].

Также не стоит забывать, что Россия является первой страной в мире по мировым запасам древесины. Леса занимают не менее 45 % территории нашей страны. При этом в мировой практике применение клееных конструкций развито уже довольно давно. В таких странах, как США, Германия, Финляндия, Великобритания, Франция строят как жилые, так и различные здания общественного назначения, а также мосты, причалы и т.п. сооружения [6, 7].

Ввиду этого экспериментальное изучение прочностных характеристик является актуальной задачей и позволит прогнозировать эксплуатационные параметры клееных конструкций в более широком диапазоне.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытания на поперечный изгиб проводились на установке рычажного типа. Балка устанавливалась на опоры с пролетом 1 м. Расчетная схема балки приведена на рисунке 1 (б). Необходимое расчетное нормальное напряжение  $\sigma$  в среднем сечении балки создавалось силой, передаваемой посредством рычага по схеме на рисунке 1 (а). Установка для измерения прогибов и напряжений при неразрушающей нагрузке состоит из рычага, нагружающих устройств, измерительных приборов, съемной термокамеры.

Балку устанавливали на опоры и к ней с помощью рычага прикладывали необходимую нагрузку. Испытания проводили в условиях повышенных температур.

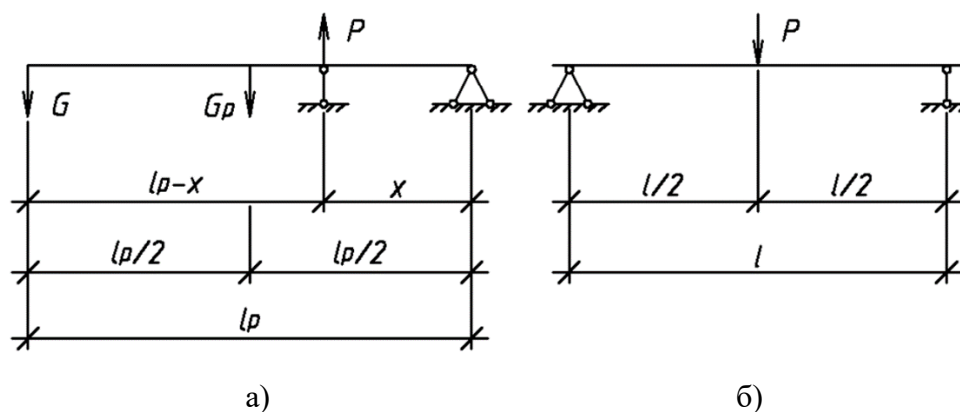


Рис. 1. Расчетная схема рычага (а) и балки (б)

Время до разрушения фиксировали электронным секундомером. Прогибы балок фиксировали индикаторами часового типа ИЧ 10-2М. Напряжения в слоях балок определяли от удлинения их волокон при действии нагрузки. Деформации (растяжения и сжатия) измеряли электрическим тензOMETром омического сопротивления. Он состоит из двух элементов: тензорезистора и регистрирующей аппаратуры АИД-4. Проводниковый тензорезистор состоит из чувствительного элемента 1 приведенный на рисунке 2 (а), который выполняется в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоки, и располагается на бумажной основе 2. Тензорезисторы устанавливались на каждый слой клееной конструкции, приведенной на рисунке 2 (б). В основу работы тензорезистора положена зависимость омического сопротивления проводника от его длины, удельного сопротивления и сечения.

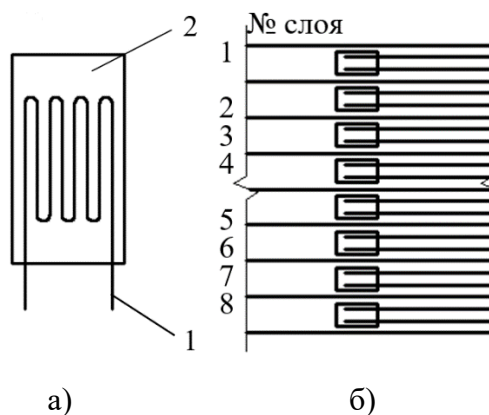
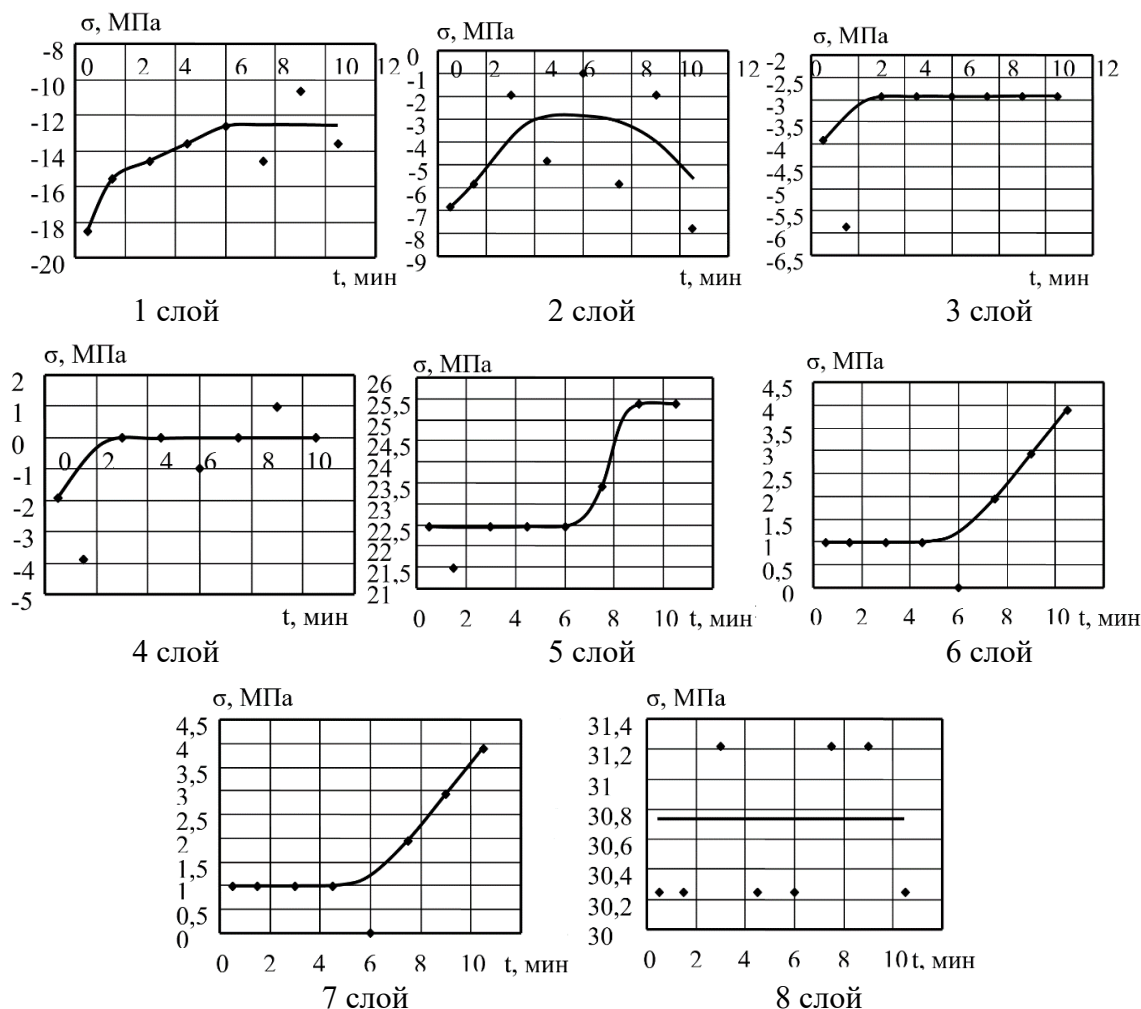


Рис. 2. Тензорезистор (а) и схема установки тензорезисторов на балке (б)

Балки изготовляли восьмислойные в виде прямоугольной призмы с размерами  $1100 \times 40 \times 80(h)$  мм. На рейки длиной 1100 мм с поперечным сечением  $40 \times 10(h)$  мм наносили клей и соединяли. Склеивание производили на рычажной установке в фиксирующем устройстве для предотвращения смещения слоев балки относительно друг друга по клею под давлением  $0,08 \text{ МПа/м}^2$  ( $0,81 \text{ кг/см}^2$ ). Прессование производилось при повышенной температуре ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ), которое создавалось тепловым вентилятором. Чтобы уменьшить теплопотери, склеиваемую балку закрывали кожухом. Время склеивания составляло 1 ч.

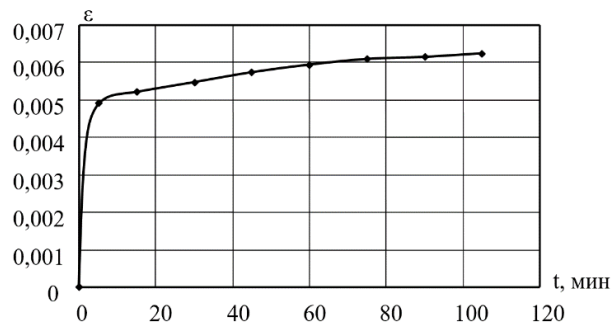
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было изучено влияние нагрузки, ее длительности и температуры эксплуатации на распределение напряжений по поперечному сечению балки и деформативность при поперечном изгибе. Изменение напряжений в слоях балки при температуре 18 °С и действии нагрузки равной 10% от разрушающей приведены на рисунке 3. Из рисунков видно, что напряжения в крайних слоях возрастают во времени, а изменение вида распределения напряжений не происходит, положение нулевых напряжений близко к середине высоты балки.



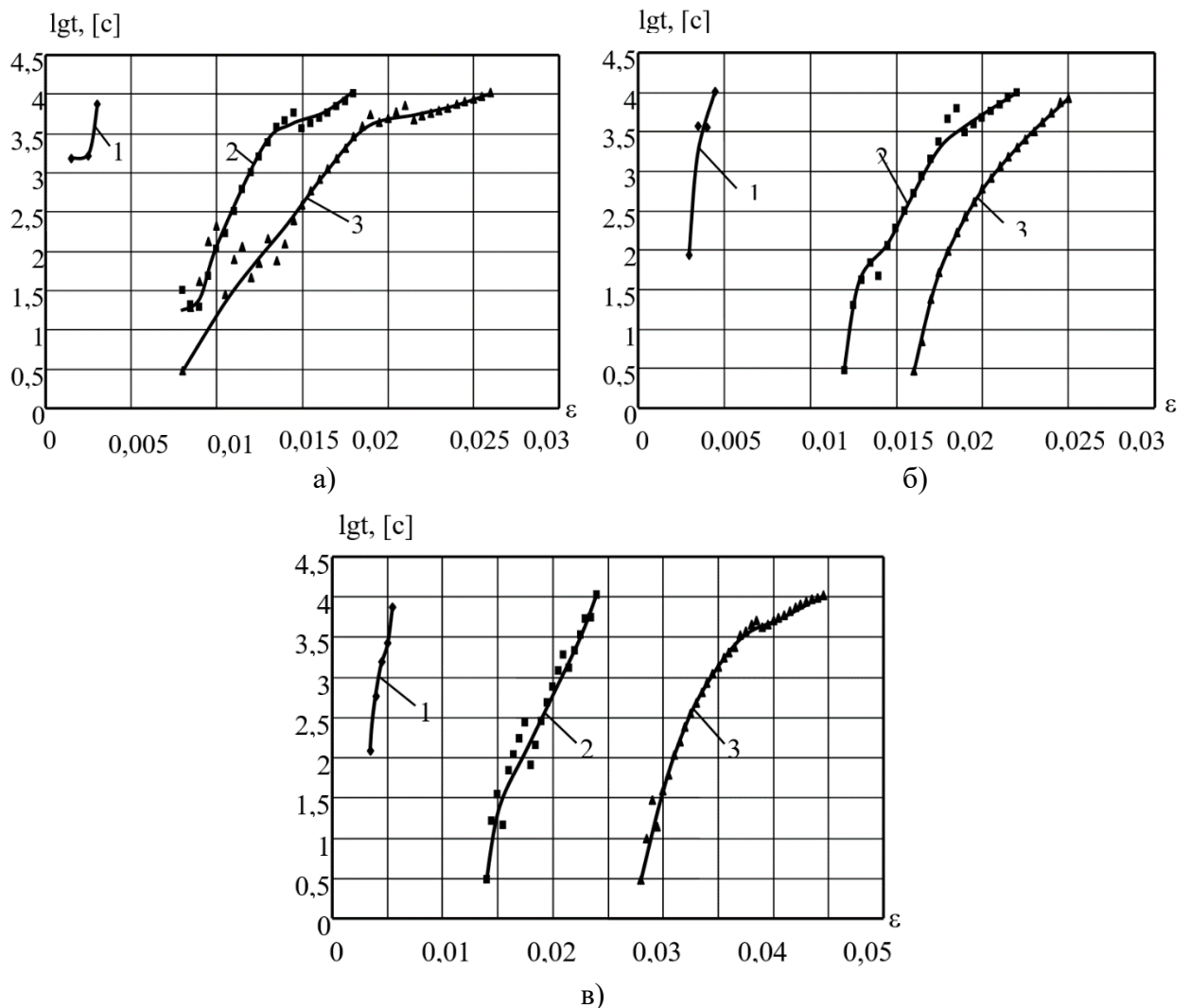
**Рис. 3.** Изменение напряжений во времени в каждом слое клеедеревянной балки

Также параллельно фиксировались прогибы, представленные на рисунке 4, из которого видно, что прогибы быстро увеличиваются в первые пять минут, затем скорость увеличения прогибов падает. Этому механизму соответствует изменение значения напряжений в верхних слоях, где скорость их изменений падает. Однако, в нижних слоях наблюдается другая зависимость – скорость изменений напряжения возрастает с течением времени. В нижнем слое напряжения остаются постоянными. Так как прогибы балок после 5 минут малы, то следует, что нарастание напряжений в нижних слоях связано с продольным растяжением слоев.



**Рис. 4.** Зависимость относительного прогиба от времени действия нагрузки

Балки подвергали действию постоянной нагрузки и в условиях неизменных температур фиксировали время достижения определенного относительного прогиба. Результаты представлены на рисунке 5.



1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 80 °С

**Рис. 5.** Логарифм времени достижения относительного прогиба от относительного прогиба при действии нагрузки 0,2·Рразр (а), 0,3·Рразр (б), 0,4·Рразр (в)

Из графиков видно, что при температуре 20 °С, которая присуще нормальному режиму эксплуатации конструкции значения прогибов достаточно невелики. При этом при повышенных температурах замечается кратный прирост значения прогиба, что наверняка можно описать нарушением клеевой связи. Увеличение нагрузки при нормальной температуре изменяет значение прогиба очень незначительно. При

повышенных температурах, дополнительная нагрузка лишь усугубляет эффект прогиба, но не является решающим фактором.

## **ВЫВОДЫ**

Получены зависимости изменения кратковременной прочности клееной древесины при отклонении температуры от нормальной. При повышенных температурах увеличивается доля разрушений по клеевому шву, а также проявляется механизм разрушения скалыванием древесины. При этом стоит отметить, что клееные конструкции имеют достаточную прочность при нормальных температурах эксплуатации, но в случае применения их в местах с высокими температурами прочностные способности значительно падают, что связано с несовершенством клеевого соединения, не приспособленного эксплуатироваться при высоких температурах.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Леонович А.А.* Древесноплитные материалы специального назначения // Изд.: Лань. 2019. 160 с.
2. *Корчаго И.Г.* Применение древесноплитных материалов в строительстве // М : Стройиздат. 1984. 94 с.
3. *Овсянников С., Ковш А.* Повышение качества клееного бруса и конструкций из древесины // Saarbuken : LAP LAMBERT. 2019. 93 с.
4. *Никитина А.В., Исакова В.В., Ашихмина А.А.* Древесина и клеи, применяемые при изготовлении клееных деревянных конструкций // Интеграция наук. 2018. № 8 (23). С. 431—433.
5. *Беляева З.В., Разводов Р.И.* Эффективность применения клееных деревянных конструкций в современном строительстве // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 1 (40). С. 74—78.
6. *Холявкин А.О.* Анализ проблем применения клееных деревянных конструкций в строительстве // Наука и образование сегодня. 2018. № 6 (29). С. 135—137.
7. *Ковальчук Л.М., Никулихина Р.В.* Деревянные клееные конструкции в строительстве // Клеи. Герметики. Технологии. 2007. № 3. С. 35—40.

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ТЕПЛОЗАЩИТЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ

**А.Н. Лапина**

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,  
l.a.n.1987@mail.ru*

## **Аннотация**

В данной статье изложена значимость вопроса энергосбережения зданий в России, который связан с использованием большого объема энергоресурсов. Этот вопрос возможно решить путем повышения энергоэффективности зданий, снижая тем самым затраты на отопление и кондиционирование.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Рациональное использование ресурсов - одна из основных проблем. Из-за истощения традиционных источников энергии и стремительного роста цен на энергоресурсы вопрос повышения энергоэффективности зданий становится одним из первоочередных.

Основная цель энергосбережения - обеспечение комфортных условий для пребывания людей в здании, при экономном использовании ресурсов. Один из лучших способов минимизировать количество потребляемых энергетических ресурсов – это повышение уровня теплозащиты зданий.

Проектирование энергоэффективных зданий подразумевает учет таких факторов как: архитектурно-планировочные решения, эффективные инженерные системы, теплосберегающие конструкции. При выборе оптимального энергосберегающего решения необходимо провести анализ финансовых затрат.

Опираясь на данные мировой статистики 2020 г., можно говорить о сокращении удельного энергопотребления – 0,8% по сравнению со средним значением снижения энергопотребления в год за период с 2000 – 2019 г. – 1,5%. Данные показатели в основном находятся в зависимости от принимаемых мероприятий по энергетической эффективности, которые в свою очередь зависят от экономических и климатических условий страны.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Объектом исследования выступают способы уменьшения объема потребляемых энергетических ресурсов, и обеспечение повышения энергоэффективности зданий. Для решения поставленной задачи был использован метод теоретических исследований, основанных на современных достижениях в области теории и практики создания зданий повышенной энергоэффективности.

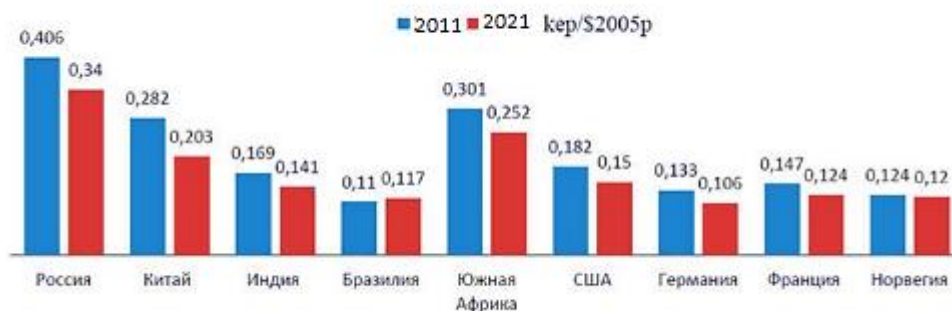
## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Не смотря на то, что за последние десятилетия в России была проведена колоссальная работа в сфере повышения энергоэффективности, страна все равно находится на начальном этапе развития в области энергосбережения. В развитых странах использование технологий, позволяющих снизить объем потребляемых энергоресурсов, началось после пережитого этими странами энергетического кризиса и продолжается по настоящее время. С тех пор на Западе были разработаны законопроекты, направленные на снижение количества потребляемых энергетических ресурсов [1].

Для достижения высоких результатов на пути повышения эффективности использования энергетических ресурсов, действия общества и государства должны быть скоординированы. По данным, представленным на рисунке (Рисунок 1.1) можно сделать



вывод о том, что в нашей стране уделяется недостаточно внимания вопросам уменьшения расходов энергетических ресурсов [2].



**Рис. 1.1** Показатели развивающихся стран с развитой рыночной экономикой в сравнении по интенсивности использования энергии на единицу ВВП

На рисунке указано количество используемой энергии на единицу ВВП странами с развитой рыночной экономикой. Россия находится на последнем месте. Ее опережают Индия, Бразилия и Китай, а показатели Южной Африки больше всего приближены к ней. Из этого графика можно понять на сколько отстает Россия и какую работу нужно проделать, чтобы вывести экономику страны на должный уровень. Опыт западных стран показал на сколько важны изменения на законодательном уровне в области энергосбережения [3].

Активное стремление к новым технологиям в плане энергосбережения служит мощным толчком для развития в этой сфере. На протяжении многих лет в России и в развитых странах ученые работают над разработкой высокотехнологичного оборудования, новых материалов и технологий. Отталкиваясь от того, что санкционный список западных стран, в том числе и на поставки высокотехнологичного оборудования постоянно увеличивается, необходимо учитывать возможный дефицит материалов и оборудования для сокращения энергопотребления, поставляемых из-за рубежа [4].

В связи со сложившейся ситуацией в мире самым логичным решением является развитие деятельности по созданию своих инновационных технологий.

Не исключено использование зарубежных разработок. Но они должны быть адаптированы под экономические и климатические условия нашей страны [5].

Основными способами энергосбережения в России сегодня являются следующие:

- Оптимизировать производство за счет использования энергосберегающих технологий;
- Повышение энергоэффективности зданий и сооружений за счет увеличения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций;
- В следствие поддержки государством оптимизации тарифов, потребителей обязывают к экономии электроэнергии [6].

Так же, учитывая политику энергосбережения в России, требуется внедрения автоматизированных систем учета в промышленных, гражданских и жилых объектах.

В западных странах люди очень озабочены состоянием окружающей среды, в которой живут, они утепляют стены, окна, двери и крыши, используют всевозможные источники энергии. К примеру, жители стараются расположить свои дома таким образом, чтобы максимально использовать солнце в качестве источника энергии, дождь – в качестве источника воды. Пользуются наиболее современными системами отопления, энергосберегающими осветительными приборами, оптимизируют сбор мусора. Подобную работу населения, направленную на повышение энергосбережения, поддерживает государство всевозможными субсидиями.

Существует такое понятие, как "пассивное жилье". Появилось оно относительно недавно. Суть его заключается в том, что в доме используется внутренняя энергия, которая вырабатывается за счет бытовых приборов, жителей и всевозможных источников энергии. Тем самым минимизируются затраты на отопление и кондиционирование. В подобных домах используется тепловые насосы и рециркуляторы, энергия солнца и ветра. За счет эффекта теплообмена воздух, который уже был использован нагревает воздух, который поступает с улицы. [7].

Дома данного вида выполнены из экологичных материалов и очень комфортны для проживания.

В западных странах строительство подобных домов применено на практике. Для строительства таких зданий используется ни один тип теплоизоляции: утепляются стены, потолок, полы и не только снаружи, но и изнутри.

Окна размещают таким образом, чтобы самые большие из них располагались с южной стороны. За счет использования оконных систем с двух- или трехкамерной конструкцией, повышается коэффициент сопротивления теплопередачи, что защищает здания от потери тепла.

В России такого типа дома используются крайне редко в связи с их высокой стоимостью. Но наряду с большими затратами на строительство нужно учитывать то, что в эксплуатации такие здания гораздо дешевле. В Москве уже существуют дома, построенные по данной технологии (жилой дом Никулино-2), а демонстрационный проект такого дома был возведен под Санкт-Петербургом.

Для проектирования зданий с высокой энергоэффективностью нужно учитывать несколько факторов [8]: окна должны располагаться на южной стороне здания; возможность регулирования тепла в системах теплоснабжения; расположение зданий вдали от других зданий и сооружений с целью уменьшения затенения; использование ограждающих конструкций с высоким сопротивлением теплопередачи; использование энергоэффективных материалов в строительстве.

В настоящее время большинство домов имеют неудачную форму, если смотреть со стороны энергоэффективности. Дома, имеющие большую плоскость ограждающих конструкций, имеют большие теплопотери.

Для это при проектировании необходимо следовать верным соотношениям таких параметров как высота, длина и ширина здания, площадь поверхности наружных стен, которая приходится на единицу площади застройки.

Так же для повышения энергоэффективности зданий необходимо применять эффективные теплоизоляционные материалы.

На данный момент одними из самых эффективных в плане теплоизоляции конструкций являются многослойные конструкции. [11]. Их эффективность заключается в том, чтобы, не увеличивая толщину конструкции, обеспечить высокий уровень сопротивления теплопередаче. Происходит это за счет использования утеплителей.

В следствие того, что здание имеет углы, выступающие элементы, балки, плиты перекрытий, светоограждающие конструкции, козырьки и т.д., которые являются мостиками холода (участки, которые имеют низкое сопротивление теплопередаче), возникает необходимость решать данную проблему, применяя элементы, выполняющие теплозащитную функцию. Подобного рода элементы должны выполнять не только функцию сопротивления теплопередачи, но и не должны портить внешний вид здания.

Можно сделать вывод, что энергоэффективность здания зависит не только от свойств самой ограждающей конструкции, но и от свойств окон и дверей. При проектировании энергоэффективных зданий нужно подходить комплексно, рассматривая его как единый объект со своей архитектурно-строительной концепцией. На сегодняшний день имеется огромное количество строительных материалов, конструкций и технологий строительства. Все это нужно учитывать уже на стадии проектирования. От знания

проектировщика и квалификации строителей зависит комфортабельность, экологичность и энергоэффективность современных зданий.

## **ВЫВОДЫ**

Из-за нерационального использования энергетических ресурсов происходит истощение источников энергии и изменение в худшую сторону экологической ситуации.

Согласно данным, предоставленным экспертами запасы энергетических ресурсов иссякнут в течение пятидесяти лет. Исходя из этого во многих странах стали делать упор на строительство энергоэффективных зданий, ведь это не только уменьшает объем использованных энергетических ресурсов, но и снижает «нагрузку» на окружающую среду.

Самой первостепенной целью повышения энергоэффективности зданий заключается в том, чтобы обеспечить население комфортным жильем с минимальными затратами на энергоресурсы. Одним из основных способов повысить энергоэффективность зданий – это увеличить сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций. Хотя на стадии строительства это увеличивает затраты, но в процессе эксплуатации это позволит снизить объем потребляемой энергии.

При проектировании подобного вида зданий учитывается не только архитектурно-планировочные решения, но и использование эффективного инженерного оборудования.

Строительство энергоэффективных зданий играет огромную роль, так как дает возможность оптимизировать расход энергетических и материальных ресурсов, при этом увеличивая технико-экономические и экологические показатели.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Комментарий к Жилищному кодексу Российской Федерации / Под ред. М.Ю. Тихомирова. - М.: Изд. Тихомирова М.Ю. - 2020. - 473 с.
2. Комментарий к Земельному кодексу Российской Федерации. - 2-е изд. доп. и перераб. - Под ред. Г.В. Чубукова, М.Ю. Тихомирова. - М.: Изд. Тихомирова М.Ю. - 2020. - 640 с.
3. О порядке установления требований к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности: постановление Правительства РФ от 15.05.2010 г. № 340 [Электронный ресурс] Доступ из системы ГАРАНТ (дата обращения 27.11.2022).
4. Жихаревич Б.С. Современная экономическая политика городских и региональных властей/ СПб.: ИСЭП РАН, 2019. - 137 стр.
5. Голикова Г.А. Современное состояние развития энергосбережения в России // Сборник трудов (по итогам VI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научное творчество XXI века»). - Красноярск, 2018. - С.132-137.
6. Бутов В. И., Игнатов В. Г., Кетова Н. П. Основы региональной экономики. —Ростов н/Д: МарТ, 2021.
7. Кузнецов В.П., Нечаев В.В. Энергосбережение в системе городского освещения как условие развития инфраструктуры ЖКХ: монография. - Н. Новгород: Изд-во ВГИПУ, 2019. - 118 с.
8. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-arhitekturno-planirovochnyh-resheniy-grazhdanskih-zdaniy-na-energoeffektivnost/viewer>
9. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obemno-planirovochnoe-reshenie-i-ego-vliyanie-na-energoeffektivnost-i-mikroklimat-pomescheniya/viewer>
10. Гагарин В.Г. «О нормировании теплопотерь через оболочку здания» // Academia. Архитектура и строительство.-2010г.- №3. -С.279-286.
11. [Электронный ресурс] URL: [https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2014/TGU\\_5\\_156.pdf](https://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2014/TGU_5_156.pdf)

## Секция 2. Строительные материалы и технологии

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.Ф. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Кочетков<sup>2</sup>, Н.С. Семенова<sup>3</sup>, И.А. Чижиков<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>ФАУ РОСДОРНИИ, г. Москва, Смольная ул., 2,

<sup>3</sup>СГТУ, г. Саратов, Политехническая 77,

<sup>1</sup>IvanovAF@mgsu.ru

<sup>2</sup>soni.81@mail.ru

<sup>3</sup>n-semenova@yandex.ru

<sup>4</sup>ilya2@mail.ru

## Аннотация

Рассмотрена целесообразность применения неразрушающих методов оценки качества строительства дорожной одежды при ограниченных ресурсах на мониторинг. Выполнен анализ комплексного использования возможностей малых беспилотных летательных аппаратов, оснащенных фотоаппаратурой и тепловизором. Проверена гипотеза взаимосвязи физико-механических свойств асфальтобетона и оттенков цвета его увлажненной поверхности. Предложено использовать материалы фото и тепловизионного обследования для определения размеров основных видов деформаций и разрушений асфальтобетонных покрытий. По результатам экспериментальных работ установлена зависимость свойств асфальтобетона от его влажности, влияющей на оттенки цвета поверхности асфальтобетонного покрытия. Применение новой методики оценки качества строительства асфальтобетонных покрытий улиц и дорог с применением БПЛА значительно повышает объективность и производительность работ.

## ВВЕДЕНИЕ

При оценке качества асфальтобетонного покрытия для целей строительного контроля, диагностики автомобильных дорог, судебной экспертизы, составления ведомости дефектов, определения объемов работ по ремонту дорог весьма трудоемким процессом является определение площади и глубины выбоин, сетки трещин, просадок, проломов, общей длины трещин, отбор образцов асфальтобетона и последующее их испытание.

Сокращение средств на мониторинг дорожных объектов, нужный для планирования дорожно-ремонтных работ, в последние годы является неуклонной тенденцией. В связи с этим представляется обоснованным стремление применять максимально экономные и мобильные методы контроля. В последнее десятилетие наблюдается нарастающий интерес специалистов различных отраслей, деятельность которых связана с измерениями различных объектов на земной поверхности, к применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1,2,3].

Заслуживают внимания исследования по применению беспилотников для оценки качества конкретных локальных объектов дорожной инфраструктуры. По восходящей проводятся работы по оценке качества дорог с применением БПЛА [4,5,6]. На основе выполненных работ составлены методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с применением БПЛА при изысканиях для строительства и реконструкции автомобильных дорог [7]. Однако следует признать, что применение БПЛА в дорожной отрасли к настоящему времени не является массовым.

На основе выполненного авторами анализа комплексного использования возможностей малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и бортового оборудования в сочетании с современным специализированным программным обеспечением для получения достоверных топографических данных об участках строительства с минимальными затратами времени принято решение апробировать новую

методику при судебной экспертизе качества строительства объектов транспортной инфраструктуры. Программное обеспечение, основанное на специальных алгоритмах, дает возможность построить ЦММ и 3D модели. Применение новой методики позволит значительно повысить производительность работ, уменьшить вероятность случайного и сознательного искажения результатов измерений.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В последнее десятилетие по нарастающей применяются различные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, акустический, георадарный, динамическое нагружение и др.) для оценки качества строительства дорожной одежды. При правильном алгоритме проведения и использовании соответствующего оборудования неразрушающего контроля георадарное обследование позволяет с необходимой достоверностью определять:

- толщину конструктивных слоев дорожных одежд,
- тип, степень влажности и плотности грунтов земляного полотна и подстилающего основания;
- положение уровня грунтовых вод, а также кривой скольжения на оползневых участках;
- пространственное очертание подошвы геологических слоев под телом насыпи;
- местоположение зон разуплотненных грунтов, пустот и инфильтрации подземных вод.

Многолетний опыт контроля качества материалов слоев дорожной одежды по кернам, полученным в результате бурения керноотборником, позволил выявить помимо достоинств и недостатки данного метода.

Последние 15 лет в России неуклонно, по восходящей, проводится интенсивная работа по унификации нормативных документов и приборов для дорожных лабораторий. При этом акцент делается на применение более совершенных средств и методик контроля с использованием информационных систем и технологий. Прослеживается тенденция разработки приборов, которые в идеале генерируют протокол испытаний в электронном виде. Разработаны программы для генерирования информации по результатам испытаний, полученных после реализации матрицы планирования эксперимента, в виде таблиц, уравнений, графиков, которые существенно упрощают процедуру анализа полученных результатов.

При проведении исследования объекта экспертизы использовались средства визуализации, поверенные (калиброванные) средства измерения и определения вероятностно-статистических величин допустимого риска причинения вреда государственным ценностям, а именно:

- средства измерения линейных размеров (измерительная рулетка, измерительная линейка, курвиметр);
- трехметровая рейка;
- георадар;
- прибор определения коэффициента сцепления;
- беспилотный летательный аппарат

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Значения показателей качества асфальтобетона и составляющих его материалов имеют значительный разброс, часто превышающий допустимые пределы, регламентируемые стандартами. Стандартами предписано в этом случае повторять испытания до получения результатов с допустимыми отклонениями относительно среднего значения.

Многолетняя практика приготовления и испытания образцов асфальтобетона показывает, что даже в случае подбора минеральной части из узких фракций, показатели свойств нередко имеют недопустимый разброс.

Поэтому бытует практика ведения чернового и чистового журналов регистрации полученных результатов. По черновому журналу определяют средние значения показателей свойств асфальтобетона, а потом рассчитывают нужные значения и заносят в чистовой журнал.

Для пресечения такой практики и изобретают приборы с электронной фиксацией первичных данных. Многие специалисты справедливо считают, что для материалов с нестабильными свойствами, первичные результаты должны предварительно анализироваться экспериментатором, который отсекает результаты, признанные им случайными.

Современные компьютерные программы позволяют внести нужные данные в электронную память испытательного оборудования. Так что одна из целей компьютеризации испытательного оборудования (исключение сознательного искажения результатов) не всегда достижима.

Многолетняя практика обследования автомобильных дорог и оценки качества строительства асфальтобетонных покрытий, включая определение физико-механических свойств асфальтобетона позволила авторам выдвинуть гипотезу стабильной зависимости качества асфальтобетона от его влажности, влияющей на оттенки цвета поверхности асфальтобетонного покрытия.

В апреле 2022 года авторы впервые использовали указанную зависимость при проведении экспертизы дороги *«Подъезд от автомобильной дороги «Михайловка (км 29,4) – Даниловка – Котово» к х. Попов» в Даниловском муниципальном районе Волгоградской области* с подтверждением на основе инструментальных измерений.

Месторасположение подъезда к хутору Попову (Даниловский район Волгоградской области) представлено на снимке из космоса (рис. 1).



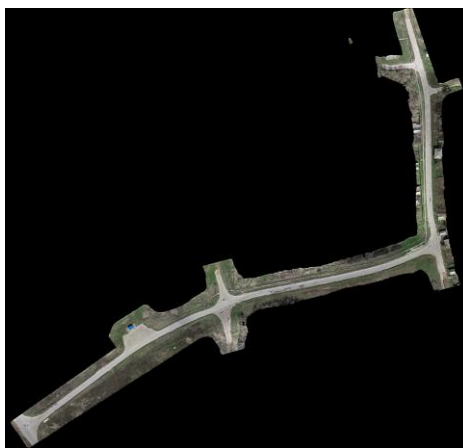
**Рис. 1.** Месторасположение подъезда к хутору Попову

Заключение экспертов основывается на положениях, дающих возможность проверить обоснованность и достоверность сделанных выводов на базе общепринятых научных и практических данных.

Условия проведения экспертизы: Объект экспертизы находился в доступном для обследования состоянии, снег и лед отсутствовали. Ясно, солнечно. Днем ранее прошел дождь.

При обследовании использовались фото и видеоаппаратура, а также средства визуализации беспилотного летательного аппарата.

По результатам пролета примененного при экспертизе беспилотного летательного аппарата были получены фотографии сверху объекта экспертизы. Путем их наложения друг на друга был составлен ортофотоплан (рис. 2) с привязкой к сформированным на объекте экспертизы характерным опорным точкам.



**Рис. 2.** Ортофотоплан

Данный ортофотоплан был помещен в программу автоматизированного проектирования конструкторской документации, которая позволяет определять размеры выявленных дефектов и повреждений.

Определение размеров участков асфальтобетонного покрытия с дефектами выполнялось в следующем порядке:

1. Сгенерированный ортофотоплан формате JPEG загружался на компьютере в программу AUTOCAD.

2. Изображение масштабировалось (увеличивалось) до величины, позволяющей зрительно различать оттенки цвета асфальтобетонного покрытия, трещины, выбоины, разрушения кромок, просадки и другие разрушения.

3. По известному размеру реперного элемента (канализационный люк диаметром 600мм) на рассматриваемом участке определялся масштаб изображения.

Принятый масштаб изображения плана анализируемого объекта, стандартизированный размер выбранного опорного реперного элемента, возможности использованного программного продукта (AUTOCAD) позволяют определять размеры выбранного фрагмента плана объекта с точностью до сантиметров (погрешность не превышает 10см), что вполне достаточно для решения поставленной задачи (определение размеров участков асфальтобетонного покрытия с недопустимыми дефектами).

За день до проведения экспертизы в Хутор Попов прошел дождь. Участки проезжей части, которые были построены по установленной в проектной документации технологии на момент проведения экспертизы были уже сухими. В тоже время некоторые участки проезжей части были еще во влажном состоянии, хотя конструкционно они были одинаковыми с сухими участками (рис. 3).



**Рис. 3.** Влажные участки асфальтобетонного покрытия с высокой пористостью

4. В программе AUTOCAD определялись размеры участка, для отчетности делалась копия участка, которая в формате PDF помещалась в приложение.

5. Результат измерения размеров дефектного участка заносился в таблицу.



6. Изображение покрытия перемещалось по экрану монитора до появления следующего дефектного участка, и выполнялись операции 4-6.

Описанный процесс повторялся до конца обследуемого объекта.

В процессе работ по экспертизе объекта проводилось георадарное обследование, отбирались образцы асфальтобетона.

Большинство отобранных асфальтобетонных образцов с влажной поверхностью разрушались (рассыпались) при их извлечении. Материал покрытия образцов визуально и на ощупь был влажным, что является признаком высокой пористости и трещиноватости устроенного асфальтобетонного покрытия, вызванной неправильным подбором гранулометрического состава при изготовлении на асфальтобетонном заводе либо недостаточным уплотнением, либо нарушением последовательности применения гладковальцовых и виброкатков. Это свидетельствует на признаки неустраняемых дефектов для данных участков, которые требуют переделки, в том числе со снятием материала дефектных участков, вывоза и утилизации его на специализированных полигонах отходов.

На участках с выявленными значительными нарушениями были отобраны пробы (вырубки) из асфальтобетонного покрытия. На других участках использовался для подтверждения соответствия толщины слоев дорожной одежды проекту вместо вырубок также использовался компьютерный видеозонд ТУРЕ-С (производство КНР, рис. 4).



**Рис. 4.** Компьютерный видеозонд

В процессе экспертизы была сформирована ведомость дефектов,

Выполненные работы убедительно подтвердили выдвинутую авторами гипотезу о зависимости качества асфальтобетона от его влажности, влияющей на оттенки цвета поверхности асфальтобетонного покрытия

Для повышения объективности и объема информации о качестве дороги и асфальтобетонного покрытия авторы планируют на беспилотный летательный аппарат дополнительно установить тепловизор.

Не так давно такое понятие, как тепловизионное обследование не было известно широкому кругу потребителей, однако в последнее время этот вид диагностики завоевывает все большую популярность [8,9].

Тепловизионное обследование — это разновидность теплового контроля, в котором в качестве измерительного прибора применяется тепловизор. Тепловизор позволяет «видеть тепло» и отображать температурный образ на дисплее прибора. Основное отличие этого метода состоит в том, что тепловизор позволяет видеть то, что невозможно увидеть невооруженным глазом. Глаз человека не способен определить температуру объектов, в то

время как тепловизор способен отразить на своем дисплее термограмму объекта с точностью  $\pm 1$  С.

Благодаря уникальным свойствам прибора он широко применяется для энергоаудита зданий. Очень часто при помощи тепловизора выявляются дефекты строительных работ при монтаже строительных панелей, монтаже крыши, оконных конструкций и входных дверей. Тепловизионное обследование позволяет однозначно определить не только наличие дефектов, но и точное их месторасположение, что позволяет своевременно устранить источники тепловых потерь.

Температура контролируемого объекта изменяется относительно окружающей среды в результате выделения или поглощения тепла в объекте. Распределение температуры по поверхности позволяет получить информацию о внутренней структуре асфальтобетона и наличии скрытых дефектов.

Применение тепловизора для диагностики асфальтобетонных покрытий предложено авторами впервые.

## **ВЫВОДЫ**

Выполненные работы позволяют сформулировать в общем виде практические рекомендации по применению новой методики оценки качества строительства асфальтобетонных покрытий:

1. С помощью поливомоечной машины наносится вода на поверхность асфальтобетонного покрытия.
2. Запускается БПЛА для получения фотографий и теплофизической картины асфальтобетонного покрытия.
3. Через определенные промежутки времени съемка повторяется.
4. Для установления фактических показателей физико-механических свойств асфальтобетона и их корреляционной зависимости с результатами съемки отбираются пробы асфальтобетона с сухих и влажных участков асфальтобетонного покрытия.
5. Выполняются камеральные работы в лаборатории.
6. Составляется экспертное заключение о качестве строительства обследованного объекта.

Реализация новой методики мониторинга дорожных объектов позволяет при минимальных затратах получить большой массив объективной информации о качестве строительства асфальтобетонных покрытий: площадь покрытия с выбоинами, местными впадинами (по площади луж на покрытии и цифровой модели поверхности асфальтобетонного покрытия), общая длина трещин, площадь сетки трещин, глубина трещин, площадь покрытия с недопустимо высокой пористостью асфальтобетона. Полученная информация позволит определить объемы работ для планирования и реализации дорожно-ремонтных работ.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Костюк А.С.* Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БПЛА // Гео-Сибирь. – 2010. – Т. 4. – № 1. – С. 83–87.
2. *Карпович М.А., Герштейн Л.М., Паневин Н.В., Карпович А.М.* Применение БПЛА при проведении топографо-геодезических изысканий // Транспортная стратегия – XXI век. – 2013. – № 22. – С. 20–22.
3. *Писарев А.В.* Возможности применения БПЛА для построения высокоточной цифровой модели рельефа местности малых рек // Проблемы теории и практики современной науки / Материалы V Международной научно-практической конференции. Издательство «Перо». – 2016. – С. 95–98.
4. *Филиппов Д.В., Великжанина К.Ю., Грядунов Д.А.* Состояние автомобильных дорог изучает БПЛА // Дороги. Инновации в строительстве. 2012. №20. С. 74-78.
5. *Наконечный В.Н., Середа П.О., Лебедева И.В., Цаль А.Ю.* К вопросу использования беспилотных летательных аппаратов для мониторинга и диагностики автомобильных дорог // Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство. Т. 2. Технические науки». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. С. 305-308.
6. *Бургутдинов А.М., Гарифзянов Р.Д., Окунева А.Г., Стецюк К.С.* Анализ дистанционных и визуальных методов оценки состояния дорожного покрытия // Вестник Пермского национального

- исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2015. №2 (18). С. 74-84.
7. ОДМ 218.9.017-2019 Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с применением беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог. Росавтодор. Москва 2019.
  8. Влияние теплофизических характеристик противогололедных материалов на разрушение снежно-ледяных образований на автомобильных дорогах / А.В.Бобков, А.В.Кочетков, С.П. Аржанухина // Дороги и мосты. 2017. № 37. - С. 156-170.
  9. Учет теплофизических характеристик противогололедных материалов при зимнем содержании автомобильных дорог: монография / С.П.Аржанухина, А.В.Бобков, А.В.Кочетков, Д.А.Кочетков.- Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия. 2022. - 220 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СПОСОБОМ ОПУСКАЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Т.М. Хафизов<sup>1</sup>, А.Х. Байбурин<sup>2</sup>, А.Д. Овчинников<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», 454080, г. Челябинск, просп. Ленина, д. 76,

<sup>1</sup>khafizovtm@susu.ru

<sup>2</sup>baiburinak@susu.ru

<sup>3</sup>ovchinnikovad@susu.ru

### Аннотация

Объект исследований – технология нового способа «опускаемого бетона». Статья посвящена выбору концепции для исследований с эмпирической проверкой возможных вариантов технологии, анализу результатов предварительных исследований. Описана конструкция исследовательской установки, приведены результаты исследований на экспериментальной установке по определению начальной прочности бетонных элементов, введено понятие «оболочковой прочности» для каждого опускаемого бетонного слоя. Выбраны принципиальные пути решения наиболее сложной задачи поиска технологических параметров для повышения адгезии в технологических швах будущей конструкции. Рекомендован матричный способ увеличения площади сцепления между бетонными слоями, что приближает формирование к бесшовной технологии.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема основана на несоответствии вводимых объемов жилья в Российской Федерации требованиям, установленным из условия естественного выбытия ветхих и аварийных зданий и замены их новыми – один квадратный метр на одного жителя в год. Научная значимость данной проблемы заключается в решении целого ряда теоретических и практических задач через комплексное исследование новой технологии формирования железобетонных изделий для скоростного строительства [1].

Актуальность обусловлена решением задачи национального масштаба – реализацией программы доступного жилья. Ускорение реализации национальной программы возможна методом блочного (модульного) домостроения с мобильными цехами изготовления блоков. Это позволяет снизить стоимость жилья, повысить рентабельность и скорость строительства [2, 3, 4]. Новизна заключается в способе формирования изделий. Предложена концепция производства на основе «гибких» опалубочных систем (стендов) и способа опускающегося бетона [5, 6]. Для изучения механики нового процесса формирования железобетонного изделия с последующим оформлением патентов на изобретение разработаны экспериментальная и опытная установки. Опыт исследований в данной области упрощенно аналогичен исследованиям метода скользящей опалубки [7, 8]. В предлагаемом способе опалубка остается на месте, а опускается формируемое изделие. Таким образом, это разные процессы по механике взаимодействия опалубки и бетона и гравитационной направленности воздействия. Новизна технологии заключается в выполнении всего комплекса монолитных работ по устройству изделия на одной технологической отметке, с обеспечением более равномерного движения готовой конструкции с минимальными перекосами и остановками для выравнивания опалубочной формы.

Для ускорения процесса набора прочности бетонной смеси и восприятия веса от вышележащих слоев, а также повышения оборачиваемости опалубочной формы, предполагается осуществлять прогрев бетона в процессе твердения. Для этого необходимо выполнить моделирование температурных полей и набора прочности бетона при разных способах прогрева бетона: электродном прогреве, где в качестве электродов выступают

противоположные щиты опалубочной формы, и инфракрасном нагреве после выхода бетона из формы.

На основании многокритериальной оценки способов и вариантов температурного выдерживания бетона необходимо определить оптимальный режим, обеспечивающий выполнение нормативных требований по максимальной температуре выдерживания, максимальным скоростям набора и снижения температуры бетона, а также позволяющий получить требуемую прочность бетона при наименьших затратах времени и потреблении электроэнергии. После расчетного обоснования оптимальный режим температурного выдерживания бетона будет апробирован на экспериментальной установке в производственной лаборатории.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Для организации эксперимента спроектирована и сконструирована исследовательская установка имени профессора С.Г. Головнева. Установка состоит из металлического каркаса размерами 1,1x1,1x2,2 м и разделена на три секции: нижнюю, среднюю и верхнюю. По периметру каркас установки обшит теплоизоляцией с открывающимися дверками для выполнения условий пожарной безопасности.

Нижняя часть состоит из принимающего горизонтального лотка, закрепленных на каркасе вертикальных электродов инфракрасного излучения с отражателями тепла. Из нижней части происходит выемка готовых бетонных изделий. Нижняя часть и средняя часть разделены горизонтальным, теплоизолирующим диском со сквозным отверстием для прохождения бетонного элемента.

В средней части размещена термоактивная (греющая) опалубочная система, состоящая из вертикальных греющих щитов, палуба выполнена из материала гетинакс. Нагревательные элементы – это гибкие греющие полосы ЗМ-468мр. В вертикальную палубу встроены температурные датчики для обратной связи с регистрирующей аппаратурой. Вертикальные щиты перемещаются в горизонтальном направлении по салазкам, для закрепления щитов установлены фиксирующие узлы, на щитах находятся бобины для намотки полиэтиленовой пленки, которая во время процесса опускается в вниз вместе с бетонной смесью, выполняя функции смазки опалубки и сохранения влаги. Размеры вертикальных палуб: 100x600 и 150x600 мм, это позволяет формировать бетонные элементы сечением 100x100 и 100x150 мм. Горизонтальный щит состоит из металлического каркаса и палубы из гетинакса. Горизонтальная опалубка выполнена с возможностью изменять размеры: 100x100 и 100x150 мм, по центру опалубки закреплен трос для опускания и подъема горизонтального щита. На металлическом столике рядом с наружной обшивкой закреплена ручная фрикционная лебедка с барабаном для троса и ручкой. В верхней части средней секции находится теплоизоляционная крышка с входным лотком для подачи бетонной смеси.

Верхняя часть спроектирована, как П-образный металлический каркас, к верхней балке прикреплен крюк, на который навешивается динамометр ДЭП/6-1Д-1Р-2 для определения сцепления и трения, а также массы. К динамометру сцепляется блок для троса, трос соединяет лебедку и горизонтальный опалубочный щит. На верхней балке установлены два светодиодных светильника, для более точного определения глубины опускания бетонной смеси. На левой и правой стойке закреплены электрические щиты, к которым подведены провода нижней, средней и верхней частей экспериментальной установки. В щитах находится автоматическое электрооборудование, контролирующая и регистрирующая аппаратура. Конструкция экспериментальной установки (без теплоизоляционного кожуха) показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция экспериментальной установки

Кратко опишем последовательность выполнения исследования технологических параметров нового способа:

- в опалубочное пространство заполняется самоуплотняющаяся бетонная смесь (в перспективе предусмотрено ультразвуковое оборудование для вибрации технологических швов);
- горизонтальная поверхность бетонного слоя штамуется пирамидальной матрицей;
- включается регистрирующая, контролирующая аппаратура, приборы и термоактивные щиты;
- уложенный бетонный слой набирает начальную (оболочковую) прочность, необходимую для сохранения формы;
- вертикальный опалубочный щит горизонтально перемещается от стенки бетона на 5 мм;
- горизонтальный щит посредством лебедки и троса вместе с сформованным бетонным слоем и расположенной по периметру полиэтиленовой пленкой опускается вниз на проектную глубину;
- вертикальный щит возвращается на исходное место и вновь заполняется опалубочное пространство бетонной смесью;
- после набора прочности последнего бетонного слоя, выходящего с нижней кромки опалубки, не менее 3 МПа, бетонное изделие опускается в нижнюю часть, открывается защитная дверка и вынимается объемный элемент (в дальнейшем может быть предусмотрен инфракрасный обогрев бетона ниже опалубки).

Прочность бетона определялась на прессе WAW-600 кН, с компьютерной визуализацией графиков нагружения.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Основная задача предварительных исследований на экспериментальной установке состояла в том, чтобы доказать гипотезу о технической состоятельности метода опускаемого бетона. Во-первых, нам нужно определить ту минимальную прочность, при которой форма элемента уже сохраняет свои геометрические размеры, не деформируясь. Во-вторых, при этой прочности нужно сохранить возможность бетонной смеси к сцеплению со следующим слоем.

Принятые варианты состава материала: 1) пескобетон класса на сжатие В22,5 – 100 %; 2) пескобетон В22,5 – 97,5 %, адгезив – 2,5 %; 3) пескобетон В22,5 – 95 %, адгезив – 5 %; 4) пескобетон В 22,5 – 90 %, адгезив – 10 %.

Температурный режим принят: сухой (в полиэтиленовой «рубашке» для сохранения влажности), температура нагрева вертикальных щитов опалубки – 40, 50 и 60 °С. Временной режим выдерживания в опалубке: 45, 60, 75 и 90 минут. Было проведено 36 экспериментов, по 9 экспериментов на каждый состав материала, разделяя по 3



эксперимента на температурные режимы. Оказалось, что независимо от состава бетонной смеси, минимальная (оболочковая) прочность составляет в пределах: 0,04–0,06 МПа (0,40–0,60 кгс/см<sup>2</sup>). Результаты начальных экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты определения минимальной (оболочковой) прочности бетона, МПа

Срок выдерживания, мин	Пескобетон при температуре, °С			С адгезивом 2,5% при температуре, °С			С адгезивом 5% при температуре, °С			С адгезивом 10% при температуре, °С		
	40	50	60	40	50	60	40	50	60	40	50	60
30	–	–	0,034	–	–	–	–	–	0,01	–	–	–
45	0,020	0,025	0,069	–	–	–	–	–	–	–	–	–
55	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,027
60	0,066	0,075	0,152	0,023	–	0,067	0,005	0,010	0,058	–	–	–
70	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,060
75	0,075	0,160	–	0,038	0,010	0,088	–	0,030	0,150	–	0,028	0,075
85	–	–	–	–	0,07	–	–	–	–	–	–	–
90	–	–	–	0,080	0,110	0,211	0,021	0,092	–	0,021	0,042	–
105	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,038	0,104	–
120	–	–	–	–	–	–	0,097	–	–	0,058	–	–

При испытаниях образцов на определение прочности начального этапа твердения было установлено, что прочность образца по сечению разная: на поверхности, по периметру нагреваемых элементов бетон схватился и набрал определенную формообразующую прочность, а бетон внутренней части образца практически не схватился, структурная прочность его низкая. Такое состояние бетонного образца с разной прочностью по его сечению, но сохраняющего форму, мы назвали «оболочковой прочностью».

Во второй части исследований рассматривалась задача увеличения адгезии между укладываемыми слоями бетона. В данном случае площадь сцепления не позволяет приблизиться к «бесшовной технологии», поэтому было предложено объемное штампование для увеличения площади сцепления. Для этого применяли объемную матрицу с пирамидальными выступами, что позволило увеличить площадь сцепления в 2,5 раза. Второй способ увеличения адгезии – это применение клеев, пропиток и адгезионных добавок.

На экспериментальной установке было изготовлено 4 бетонных элемента 100x100x300 мм без технологических швов, а также 16 бетонных элементов с двумя технологическими швами по 4 образца на каждый технологический способ (рис. 2):

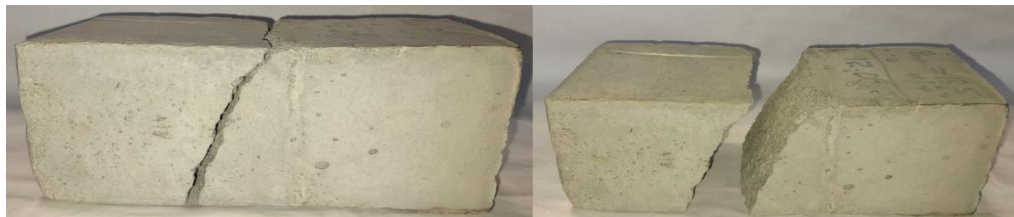
- с технологическими швами посредством простой адгезии;
- с технологическими швами посредством клеящего слоя «бетон-контакт»;
- с технологическими швами посредством клеящего слоя «адгезив»;
- с технологическими швами посредством адгезионной бетонной смеси.



Рис. 2. Образцы для испытания прочности сцепления слоев

Все 20 экспериментов на определение прочности технологических швов, к сожалению, пока не полностью закончены (не прошло 28 суток), но первые образцы элементов с технологическими швами посредством простой адгезии показали, что излом

происходит не по технологическому шву, а под углом  $45^\circ$  к продольной оси элемента (рис. 3), что удовлетворяет требованиям технологии. (Публикация окончательных результатов планируется в ближайшее время).



**Рис. 3.** Характер разрушения образцов

## ВЫВОДЫ

Для исследования запатентованной технологии опускаемого бетона изготовлена научно-исследовательская установка, моделирующая формирование конструкций новым способом. Первые результаты исследований на установке экспериментально подтвердили гипотезу о технической состоятельности метода опускаемого бетона. В результате исследований на установке определена так называемая «оболочковая прочность», которая обеспечивает сохранение формы конструкции, но требует дальнейшего модельного изучения с учетом производительности метода. Обосновано решение «бесшовной технологии» посредством штампования технологического шва матрицей с пирамидальными выступами. Выполненное начальное исследование позволяет корректировать прогнозируемые технологии подземного и наземного строительства методом опускаемого бетона, а также изготовления блок-комнат для модульного домостроения посредством мобильных цехов, ранее описанные в авторских патентах и статьях [9, 10, 11].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Головнев С. Г. Современные строительные технологии: монография. М.: ЮУрГУ, 2010. 268 с.
2. Тешев И.Д., Коростылева Г.К., Попов М.А. Объемно-блочное домостроение // Жилищное строительство. 2016. №3. С. 26–33.
3. Сауков Д.А., Гинзберг Л.А. Современное модульное строительство // Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур Safety-2018, Екатеринбург. 2018. С. 69–82. URL: <http://hdl.handle.net/10995/66309> (дата обращения: 07.10.2022)
4. Ализаде С.А. Объемно-блочное домостроение: опыт и перспективы развития // Архитектура и дизайн. 2017. №1. С. 38–52.
5. Мацкевич, А.Ф. Опалубки и смазки: повышающие качество и интенсифицирующие производство железобетонных конструкций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 05.23.08 МОТКЗИСИ им. В.В. Куйбышева, 1987. 42 с.
6. Способ формирования железобетонных конструкций посредством опускающегося бетона: пат. RU2566540C1 Рос. Федерация. МПК7 E04B2/84 (2006/01); E 04 G 11/22 (2006.01) / Т.М. Хафизов, С.Г. Головнев, С.Д. Денисов; заявл. 30.09.14; опубл. 27.10.2015, Бюл. №30. 2 с.
7. Мацкевич, А.Ф. Проектирование и применение скользящей опалубки : учебное пособие. М. : Горький : ГИСИ им. В.П. Чкалова, 1984. 72 с.
8. Хафизов, Т. М., Байбурун А.Х. Сравнительный анализ способа опускающегося бетона и метода скользящей опалубки // Безопасность критических инфраструктур и территорий. Проблемы безопасности строительных критических инфраструктур. Сб. статей. Екатеринбург: УрО РАН; УрФУ, 2018. С. 222-228. URL: <http://hdl.handle.net/10995/66334> (дата обращения: 12.07.2022)
9. Способ строительства подземного многоэтажного сооружения: Пат. RU2604098C1 Рос. Федерация. МПК7 E 02 D 29/045 (2006.01) / Т.М. Хафизов, А.Х. Байбурун, С.Е. Денисов, Г.Т. Хафизов; заявл. 02.11.2015; опубл. 10.12.2016, Бюл. №34.2 с.
10. Способ совмещенного строительства подземной и надземной части каркаса сооружения: Пат. RU2657565C1 Рос. Федерация: МПК E02D 29/045 (2006.01) / Т.М. Хафизов. А.Х. Байбурун. С.Е. Денисов. Р.М. Сулейманов, Г.Т. Хафизов; заявл. 27.04.2017; опубл. 14.06.2018; Бюл. №17.5 с.
11. Подземный ядерно-энергетический комплекс: Пат. RU2510088C1 Рос. Федерация: МПК7 G21H1/06 (2006.01) / Т.М. Хафизов, С.Е. Денисов, Г.Т. Хафизов; заявл. 08.10.2012; опубл. 20.03.2014, Бюл. №8. – 2 с.



## СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИНКАПСУЛИРОВАННЫМ МОДИФИКАТОРОМ

Т.Ч. До<sup>1</sup>, В.В. Столяров<sup>2</sup>, Т.В. Сусанина<sup>3</sup>, Д.В. Стибунов<sup>4</sup>, С.С. Иноземцев<sup>5</sup>  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>trongtoan007@gmail.com

<sup>2</sup>stolyarov.vladislav.2020@mail.ru

### Аннотация

В статье представлены результаты определения основных свойств щебеночно-мастичных асфальтобетонов с инкапсулированным модификатором. В качестве модификаторов использовались подсолнечное масло, как омолаживатель, и тиолсодержащий полимер, как склеивающий агент. Представлено влияние содержания капсул с различными модификаторами на основные свойства ЦМА-15.

*Ключевые слова:* асфальтобетон, капсулы, модификатор, свойства.

### ВВЕДЕНИЕ

Условия эксплуатации автомобильных дорог обуславливают высокие требования к материалам, которые применяются для устройства покрытий. Увеличение интенсивности движения автомобильного транспорта, переменные воздействия температуры, увлажнение-высушивание и т.п. отрицательно сказывается на состоянии асфальтобетонного покрытия [1]. Поэтому актуальным направлением в дорожно-строительных материалах является разработка современных способов модифицирования асфальтобетонов, как с применением минеральных [2...5], так и органических модификаторов [6...8].

Таким образом, можно утверждать, что в современную эпоху и развитие науки и техники повышение долговечности конструкции или материалов является необходимым и актуальным. В последние годы индустрия строительных материалов постоянно развивалась и достигла больших успехов: новые материалы, многофункциональные материалы, умные материалы, материалы с уникальным набором уникальных свойств и т. д. . . увеличиваясь как по количеству, так и по качеству, способствуя повышению функциональной эффективности конструкции и снижению материалоемкости производства. В целях повышения долговечности, а также срока службы здания, в строительном материаловедении появилось новое перспективное направление, которым является разработка материалов с функцией самовосстановления, то есть способностью восстанавливать функции самих себя. в конструкции, предусмотренной его назначением, которую принято называть «самовосстановлением» или «самозалечиванием» (self-healing) [9, 10].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными материалами для приготовления асфальтобетона использовались вяжущее вещество, минеральные материалы, функциональные добавки и инкапсулированный модификатор.

В качестве вяжущего вещества использовался битум БНД 60/90, отвечающий требованиям ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия».

Для обеспечения необходимого зернового состава асфальтобетона для получения ЦМА-15 минеральные компоненты смешивались в следующем соотношения: крупный заполнитель – 67 %; мелкий заполнитель – 21 %; наполнитель – 12 %.

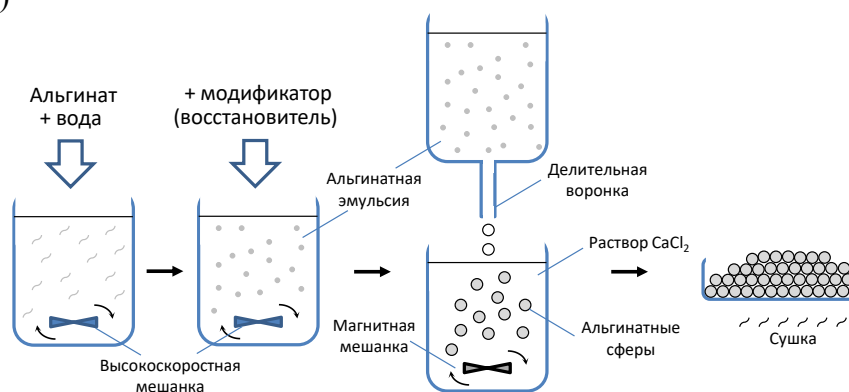
В качестве инкапсулирующего агента (инкапсулятора) использовался альгинат натрия ( $C_6H_7O_6Na$ ), представляющий собой натриевую соль альгиновой кислоты, экстрагированной из бурых водорослей [11].

В качестве модификаторов использовались традиционный восстанавливающий агент на основе подсолнечного масла и восстанавливающий агент на основе тиолсодержащего уретанового «AR-полимера» [7].

«AR-полимер» представляет собой тиолсодержащий уретановый полимер с концевыми меркаптановыми группами (SH-), произведенный ООО «ПолиМикс Казань» в соответствии с ТУ 2226-001-90014974-11 [12]. Отвердителем для используемого полимера является тетраметилтиурамдисульфид  $C_6H_{12}N_2S_4$ .

Процесс инкапсулирования представляет собой простой процесс, который начинается с приготовления раствора кальциевой соли. Приготовление раствора кальциевой соли осуществляется в смесителе принудительного действия до полного растворения  $CaCl_2$  в воде. Для приготовления альгинатной эмульсии в воду сначала добавляется альгинат натрия, который смешивается высокоскоростным смесителем (не менее 2000 об/мин), после чего в полученный раствор добавляется модификатор (восстанавливающий агент), который после интенсивного смешивания преобразуется в эмульсию. Полученная эмульсия с помощью делительной воронки делится на отдельные частицы (альгинатные шарики), которые закрепляются ионами кальция, проходя через ванну с раствором кальциевой соли. На заключительном этапе альгинатные шарики подвергаются сушке до постоянной массы при температуре 50 °С. Технологическая схема инкапсулирования модификатора (восстановителя) для асфальтобетона представлена на рисунке 1.

а)



б)



**Рис. 1.** Схема инкапсулирования модификатора (а) и вид капсул (б)

Оптимальное содержание битума в составе асфальтобетона составляет 7 %, что позволяет достичь воздушной пустоты щебеночно-мастичных асфальтобетонов 3 %. В качестве стабилизирующей добавки для предотвращения сегрегации щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси использовали целлюлозные волокна Виатоп-66 в количестве 0,3%.

Асфальтобетонная смесь после приготовления использовалась для изготовления образцов-цилиндров высотой и диаметром 71,4 мм. Для этого смесь необходимой массы помещалась в форму и уплотнялась в два этапа: с помощью вибрирования и груза, обеспечивающего нагрузку  $30 \pm 5$  кН в течении 3 минут и последующего уплотнения с помощью гидравлического пресса, обеспечивающего давление  $20,0 \pm 0,5$  МПа в течении 3 минут. Затем образец извлекается из формы с помощью выпрессовочного устройства.

Оценка основных свойств щебеночно-мастичного асфальтобетона осуществлялась в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний». Для образцов ЦМА-15 без модификатора и с инкапсулированным подсолнечным маслом и AR-полимером, содержанием 3 % от массы битума, определялись следующие показатели: средняя плотность, пористость минеральной части, остаточная пористость, водонасыщение, предел прочности при сжатии при температуре 20 °С и 50 °С, показатели

сдвигоустойчивости, предел прочности при расколе, длительная водостойкость, и коэффициент самовосстановления.

Для определения параметров физико-механических свойств асфальтобетонных использовался пресс механический Uniframe, Controls (Италия). При определении водостойкости применялась вакуумная установка ВУ-976, ВНИР (Россия).

Расчет коэффициента самовосстановления осуществлялся в соответствии с методикой представленной в работе [13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе исследовано изменение основных свойств асфальтобетона ЦМА-15 после модифицирования инкапсулированным подсолнечным маслом и AR-полимером. Очевидно, что присутствие в структуре асфальтобетонных элементов, капсул, обладающих относительно не высокой собственной прочностью, будет влиять на основные свойства материала. Основные свойства асфальтобетона без модификатора и с инкапсулированными восстанавливающими агентами представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные свойства асфальтобетонных

Наименование показателя	Ед. изм.	Требования ГОСТ	Контрольный	С модификатором	
				Масло	AR-полимер
Средняя плотность	г/см <sup>3</sup>	–	2,43	2,42	2,42
Пористость минеральной части, %	%	15...19	18	16	17
Остаточная пористость, %	%	1,5...4,5	3,0	1,7	1,8
Водонасыщение, %	%	1,0...4,0	1,9	1,2	1,3
Предел прочности при сжатии при: – 20 °С – 50 °С	МПа	не менее 2,2 не менее 0,65	3,0 1,1	2,8 0,7	3,6 1,2
Сдвигоустойчивость: Коэффициент внутреннего трения Сцепление при сдвиге при 50 °С	– МПа	не менее 0,93 не менее 0,18	0,94 0,56	0,92 0,50	0,93 0,65
Предел прочности при расколе при 0 °С	МПа	2,5...6,0	2,60	2,02	3,1
Водостойкость (длительная)	–	не менее 0,85	0,92	0,89	0,90
Коэффициент самовосстановления $k_h$	–	–	1,00	1,40	1,93

Анализ таблицы 1 показывает, что выделение оптимального количества капсул с модификатором в состав ЦМА-15 не приводит к значительному изменению средней плотности и пористости минеральной части. Остаточная пористость уменьшается при добавлении капсул, что обуславливается частичным заполнением межзерновых пустот в структуре асфальтобетона. Следствием этого является снижение водонасыщения. При этом изменение указанных показателей для различных модификаторов схоже, что, очевидно, указывает на отсутствие влияния вида модификатора на структуру и свойства

асфальтобетона. Показатели предела прочности при введении капсул с подсолнечным маслом заметно снижаются. Асфальтобетон с инкапсулированным AR-полимером отличается большей прочностью по сравнению с контрольным составом, что обуславливается наличием в составе активных добавок, серы и оксида марганца. В результате в присутствии указанных веществ асфальтобетон характеризуется большей теплостойкостью и упругостью. При этом наличие у модифицированных асфальтобетонов в составе инкапсулированных восстановителей, обуславливает у них способность к самостоятельному восстановлению, эффективность которого характеризуется показателем  $k_h$ . Этот показатель для асфальтобетона с инкапсулированным подсолнечным маслом больше на 40 %, а с инкапсулированным AR-полимером – на 93 %. Закономерно предполагать [10, 14, 15], что наличие способности самовосстановления для асфальтобетонов будет способствовать увеличению срока функционального соответствия материала необходимым требованиям.

## ВЫВОДЫ

Анализируя основные свойства асфальтобетонов, модифицированных инкапсулированными восстановителями, следует, что введение капсул незначительно влияет на объемные свойства асфальтобетона, в некоторой степени снижаются физико-механические показатели, что связано с наличием элементов, капсул, в структуре с невысокой собственной прочностью. Стоит отметить, что при некотором снижении показателей физико-механических свойств асфальтобетона отвечают требованиям нормативных документов. Модифицированный инкапсулированным восстановителем асфальтобетон, обладает коэффициентом самовосстановления с инкапсулированным подсолнечным маслом больше на 40 % чем контрольный состав, а с инкапсулированным AR-полимером – на 93 %. Наличие способности самовосстановления для асфальтобетонов будет способствовать увеличению срока функционального соответствия материала необходимым требованиям.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10051 <https://rscf.ru/project/22-79-10051/>

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Inozemtcev S.S., Korolev E.V.* Increasing the Weathering Resistance of Asphalt by Nanomodification. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. Pp.147-157.
2. *Королев Е.В., Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Самошин А.П., Иноземцев С.С.* Обоснование выбора способа наномодифицирования асфальтобетонных смесей. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2012. № 4. С. 40-43.
3. *Лесовик В.С., Прокопец В.С., Болдырев П.А.* Минеральные порошки из горных пород кислого состава. *Строительные материалы*. 2005. № 8. С. 44-46.
4. *Inozemtcev S.S., Korolev E.V.* Interaction process on the phases interface “bitumen – dispersed phase from cement stone”. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. Vol. 6 (82). Pp. 60-67. DOI: 10.18720/MCE.82.6.
5. *Inozemtcev S.S., Korolev E.V.* Mineral carriers for nanoscale additives in bituminous concrete. *Advanced Materials Research*. 2014. Т. 1040. P. 80-85. DOI: 10.18720/MCE.82.6. DOI:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.1040.80.
6. *Гохман Л.М.* Перспективы применения полимерасфальтобетона. *Автомобильные дороги*. 2021. № 1 (1070). С. 90-93.
7. *Inozemtcev S., Korolev E.V.* Active polymeric reducing agent for self-healing asphalt concrete.: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. "VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPISE 2020" 2021. P. 012002. DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012002.
8. *Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А.* Влияние углеродных нанотрубок на свойства пбв и асфальтобетона. *Вестник МГСУ*. 2015. № 11. С. 110-119.
9. *Inozemtcev S., Korolev E.* Review of road materials self-healing: problems and perspective. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 855. P. 012010. DOI:10.1088/1757-899X/855/1/012010.

10. *Xu Sh., Garcia A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlangen E.* Self-Healing Asphalt Review: From Idea to Practice. *Advanced materials interface*. 2018. Vol. 5. Issue 17. 1800536.
11. *Inozemtcev S.S., Korolev E.V.* Sodium alginate emulsions for asphalt concrete modifiers encapsulating: structural rheological properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. № 1 (101). С. 10104.
12. "AR-полимер" - тиолсодержащий уретановый полимер. <https://polymix.pro/products/arpolymer>.
13. *Sergey Inozemtcev, Denis Jelagin, Evgeniy Korolev, Hassan Fadil, Manfred N. Partl, Toan Do Trong.* Experimental and numerical study on SMA modified with an encapsulated polymeric healing agent. *Materials and Structures* (2022) 55:230 DOI: 10.1617/s11527-022-02059-8.
14. Sun D, Sun G, Zhu, Guarin A, Li B, Dai Z, Ling J (2018) A comprehensive review on self-healing of asphalt materials: Mechanism, model, characterization and enhancement. *Adv Colloid Interface Sci* 256:65–93. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.05.003>.
15. *Sitnikov N.N., Khabibullina I.A., Mashchenko V.I., Rizakhanov R.N.* Prospects of Application of Self-Healing Materials and Technologies Based on Them. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. 9(5). Pp. 785-793.

## КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СЫРЬЯ КАРАКАЛПАКСТАНА

А.Д. Жуков<sup>1</sup>, Б.И. Булгаков<sup>2</sup>, Б.Б. Турганбаев<sup>3</sup>, Б.М. Хожаберген<sup>4</sup>

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>lj211@yandex.ru

<sup>2</sup>fakultetst@mail.ru

<sup>3</sup>paluaniyazovv@gmail.com

<sup>4</sup>bekbergennxojabergenov@gmail.com

### Аннотация

Свойства изделий строительной керамики зависят от особенностей технологии их изготовления, и в первую очередь от качества сырья и корректного подбора состава сырьевых компонентов. Целью исследований является изучение свойств глин и возможности их применения в качестве сырья для производства керамзита, а также разработка основ методик подбора состава глинистых шихт и прогнозирования коэффициента вспучивания керамзитового гравия. Исследования свойств глин проводились согласно нормативным методикам и с применением методов рентгеноструктурного анализа. Разработка основ методик подбора состава и прогнозирования значений коэффициента вспучивания осуществлялась с помощью аналитической оптимизации и статистической обработки результатов активного эксперимента.

Установлено, что глина Кушканатауского месторождения Каракалпакстана по своим основным характеристикам соответствует требованиям, предъявляемым к глинам для производства керамзита. Разработанная по результатам активного эксперимента и их статистической и аналитической обработки номограмма может быть использована как для решения прямой задачи (прогнозирования коэффициента вспучивания), так и обратной (подбор состава) задач.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из критериев энергетической эффективности строительных материалов являются логистические цепочки: «месторождение сырья – производство – потребитель» и с этих позиций использование сырья Каракалпакстана для удовлетворения потребностей местного строительного комплекса является более чем целесообразным.

Использование в строительстве облегченных строительных изделий и конструкций является одним из характерных факторов современного строительства. Во-первых, эти элементы зданий менее материалоемки, то есть оптимизируются и расходы сырья и затраты на тепловую обработку. Во-вторых, эти изделия имеют меньшую теплопроводность, что положительно сказывается на показателях изоляционной оболочки и любой конструктивной системы. В-третьих, такие изделия имеют меньшую среднюю плотность, а следовательно стены имеют меньшую нагрузку на единицу длины фундамента [1–3].

В строительном комплексе Каракалпакстана преобладают изделия производимые в основном из сырьевых материалов, которые находятся за пределами регионов. Сложная логистика существенно повышает их себестоимость. Поэтому особую актуальность получает разработка новых видов строительных материалов, в том числе теплоизоляционных из местного минерального сырья, в том числе и с применением промышленных отходов [4, 5].

Каракалпакстан обладает значительными запасами глин, в том числе бентонитовых глин и суглинков, которые могут быть использованы для изготовления изделий строительной керамики, в том числе облегченных керамических стеновых материалов (кирпича и камней), а также для изготовления керамзитового гравия. Отметим, что для

региона характерно практически полное отсутствие месторождений щебня, поэтому использование керамзитового гравия как решает проблему крупного заполнителя, так и позволяет получать легкие изделия (керамзитобетонные панели, пустотелые вибрированные блоки и пр.).

Целью исследований является изучение свойств глин Каракалпакстана и возможности их применения в качестве сырья для производства керамзита, а также разработка основ методики подбора состава глинистых шихт и прогнозирования свойств (в данном случае коэффициента вспучивания) изделий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За основу исследований принята глина Кушканатауского месторождения Каракалпакстана. Исследование ее свойств осуществлялось методами рентгеноструктурного анализа [6, 7], а также по методикам ГОСТ 9169-2021. В качестве модификаторов глиняных смесей приняты органический компонент и железосодержащая добавка.

Эксперимент по изучению состава керамической смеси проводился на основе аналитической оптимизации [8]. Методика аналитической оптимизации заключается в проведении многофакторного эксперимента в два этапа: на Первом проводится эксперимент по всей выборке значимых факторов (по матрицам дробных реплик) и выделяется группа наиболее значимых факторов; на втором этапе проводится полный факторный эксперимент по D-оптимальным планам, получаются уравнения регрессии и к этим уравнениям применяется аппарат математического анализа. В результате устанавливаются степени влияния каждого из значимых факторов на результат и осуществляется построение номограмм для подбора состава мелкозернистого модифицированного бетона.

Условия эксперимента представлены в таблице 1. В качестве функции отклика принят коэффициент вспучивания керамического материала (К).

Таблица 1. Условия эксперимента

Наименование фактора	Символ $X_i$	Среднее значение фактора, $\bar{X}_i$	Интервал варьирования, $\Delta X_i$	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход твердой добавки, %*	$X_1$	2,5	1,5	1,0	4,0
Расход жидкой добавки, %*	$X_2$	2,0	1,0	1,0	3,0

\*расходы принимаются по отношению к массе глины

Осуществлялся полный двухфакторный активный эксперимент. Проверка статистических гипотез осуществлялась по критериям Стьюдента и Фишера. Доверительный интервал рассчитывался по значениям критерия Стьюдента.

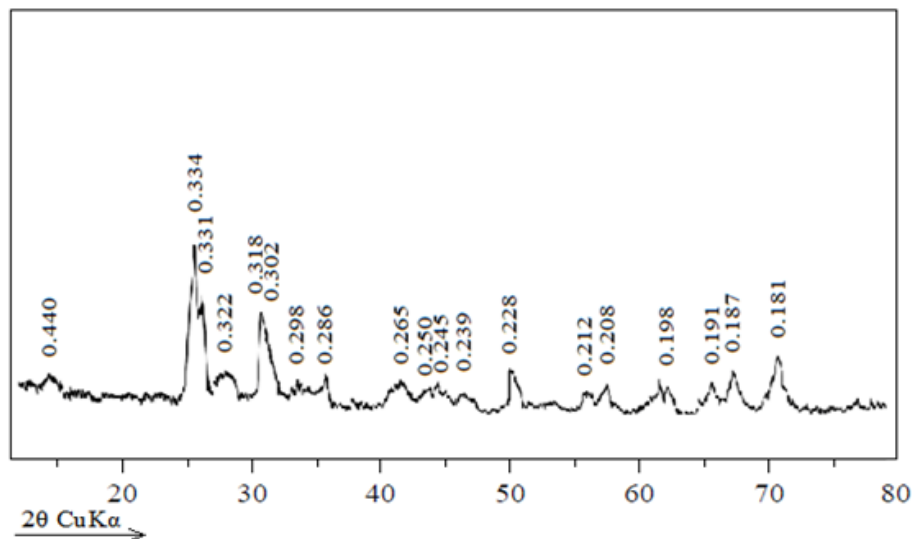
Исследования проводились в НИУ МГСУ; Каракалпакском ГУ им Бердаха; часть экспериментальных исследований была проведена с использованием средств Коллективного исследовательского центра имени профессора Ю.М. Борисова Воронежского государственного технического университета, который частично поддерживается Министерством науки и образования Российской Федерации, Контракт № 075-15-2021-662.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фазовый состав глины определяли рентгенографическим методом (рис. 1). Рентгенофазовым исследованием опытных образцов сырьевых проб Кушканатауской глины установлено присутствие дифракционных максимумов, у минералов кварца -  $d=0,427; 0,335; 0,181; 0,157$  нм; полевого шпата -  $d=0,325; 0,321$  нм; иллита -  $d=0,495; 0,377; 0,334; 0,323$  нм; монтмориллонита -  $d=0,448; 0,325; 0,258; 0,199; 0,167$  нм;

высокоглиноземистой форме монтмориллонита - бейделита -  $d= 0,725; 0,363; 0,229$  нм; доломита -  $d= 0,290; 0,180$  нм, и кальцита -  $d= 0,495; 0,377; 0,334; 0,318; 0,245$  нм.

Глина Кушканатауского месторождения, по количеству основных оксидов исследуемая глина, по показателям степени вспучивания относятся к глинистой породе с высокой степенью вспучивания, так как, кроме оксида кальция содержание основных оксидов находится в пределах требований к глинистому сырью.



**Рис. 1.** Рентгенограмма глин Кушканатауского месторождения

По факту обработки результатов эксперимента, проверки статистических гипотез и отсева незначимых коэффициентов получено следующее базовое уравнение регрессии (доверительный интервал равен 0,051):

$$K = 2,82 + 0,51X_1 + 0,29X_2 + 0,06X_1X_2 - 0,28X_1^2 \quad (1)$$

Оценка влияния факторов осуществлялась по величине коэффициента и знаку коэффициента. Анализ полинома (1) показывает, что наибольшее влияние на коэффициент вспучивания керамзита оказывает расход твердой добавки (коэффициент при  $X_1$  равный 0,51), но влияние это снижается при увеличении расхода твердой добавки (коэффициент при  $X_1^2$  равный  $-0,28$ ). Оптимальное значение расхода твердой добавки будет осуществлено в процессе аналитической оптимизации.

Расход жидкой добавки оказывает не результат меньшее значение (коэффициент при  $X_2$  равный 0,29), это влияние увеличивается при больших (в рамках интервала варьирования, таблица 1) значениях фактора  $X_1$  (коэффициент при парном взаимодействии  $X_1X_2$ , равный 0,06).

Для построения номограммы, с помощью которой можно выбирать оптимизированные параметры и прогнозировать коэффициент вспучивания керамзита осуществляется аналитическая оптимизация полинома (1).

Рассматривая уравнение (1) как алгебраическую функцию двух переменных, определяем оптимальное значение фактора  $X_1$ :

$$\frac{\partial K}{\partial X_1} = 0,51 + 0,06X_2 - 0,56X_1 = 0 \rightarrow X_1 = 0,90 + 0,10X_2 \quad (2)$$

Графическая интерпретация (оптимизационная функция в натуральных координатах) зависимости (2) представлена на рис. 2. Математическое ожидание (среднее значение) определяют по зависимости (2), дисперсию (отклонение от среднего) – с учетом возможной ошибки эксперимента.



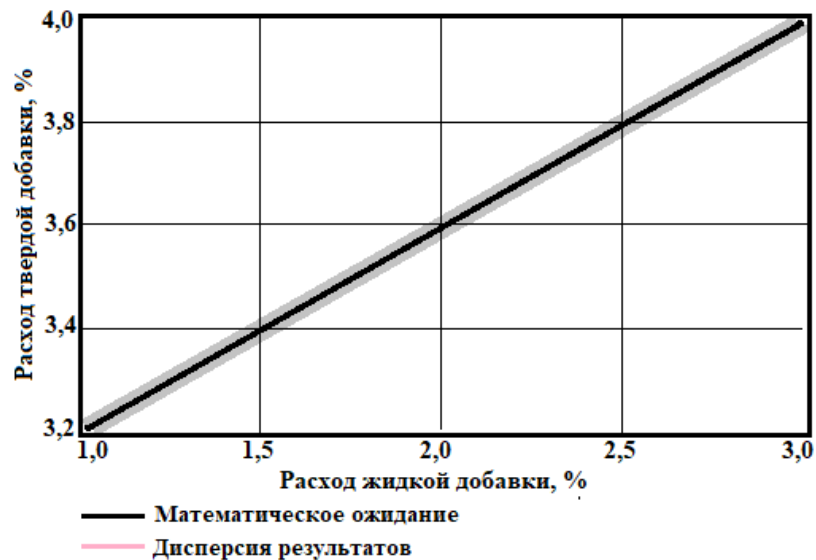


Рис. 2. Оптимизационная функция (2)

Формируем оптимизированное по  $X_1$  (с учетом доверительного интервала, равного 0,051) уравнение зависимости коэффициента вспучивания от варьируемых факторов:

$$K = 2,82 + 0,51(0,91+0,11X_2) + 0,29X_2 + 0,06(0,91+0,11X_2)X_2 - 0,28(0,91+0,11X_2)^2$$

$$K = 3,03 + 0,36X_2 \tag{3}$$

Графическая интерпретация оптимизированного уравнения (3) представлена на рис.3

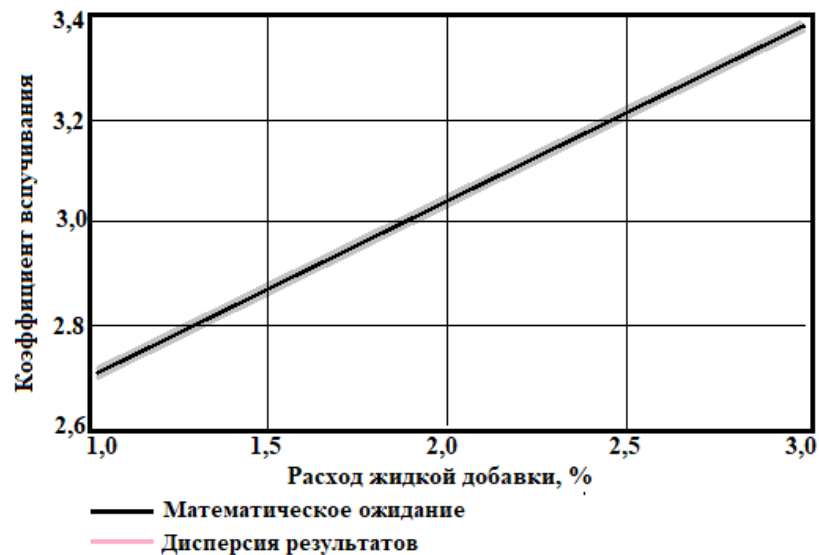
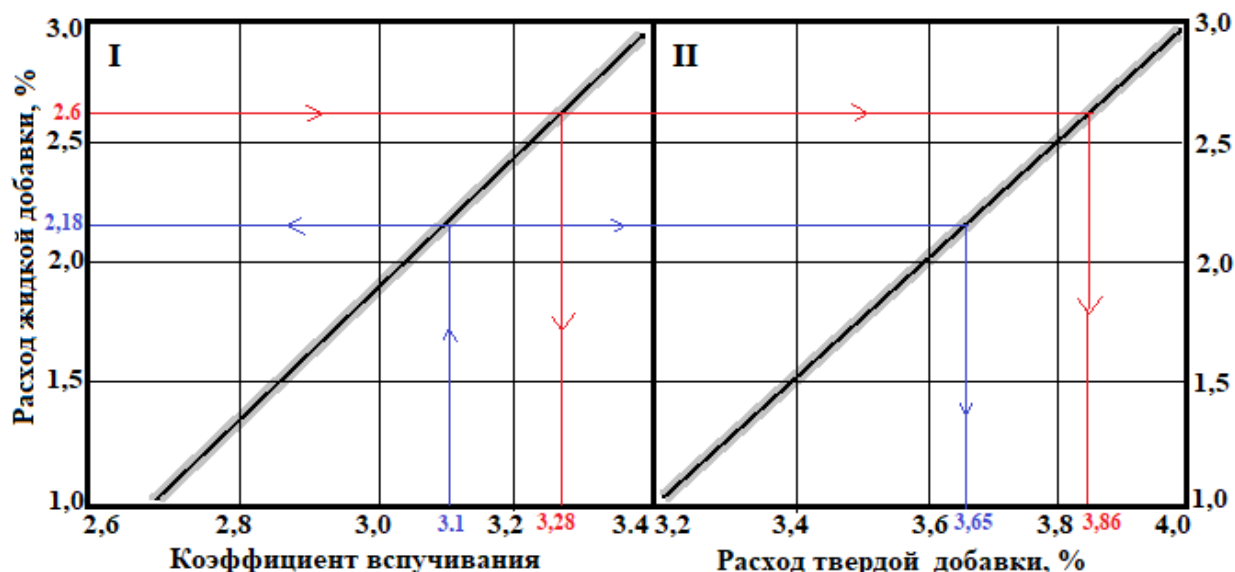


Рис. 3. Оптимизированная зависимость коэффициента вспучивания от расхода жидкой добавки

Объединяем графики 2 и 3 в единую номограмму (рис. 4). Номограмма состоит из двух секторов. В секторе I устанавливается зависимость между коэффициентом вспучивания и расходом жидкой добавки. В секторе II — устанавливается связь между расходами добавок с учетом оптимизационного решения. С учетом статистических

ошибок эксперимента (исходя из уровня точности предсказания результатов 0,9, в графики введены области допустимых отклонений (дисперсии результатов) от наиболее вероятного значения (математического ожидания) — «серые зоны».



**Рис. 4.** Номограмма для подбора состава и прогнозирования величины коэффициента вспучивания керамзита

Решение прямой задачи (прогнозирование коэффициента вспучивания в зависимости от значений факторов) осуществляется следующим образом (красные линии). Устанавливают расход жидкой добавки (допустим 2,6%) и проводят прямую линию параллельно оси абсцисс до пересечения с графиками I и II. Из точек пересечения опускают перпендикуляры на ось абсцисс и получают значения коэффициента вспучивания (3,28) и расхода твердой добавки (3,86%). Проводят контрольные формовки и вспучивание и сравнивают полученные результаты с расчётными.

Решение обратной задачи (определение расходов добавок, соответствующих заданному коэффициенту вспучивания). Задаем желаемый коэффициент вспучивания (3,1). Проводим линию параллельную оси ординат до пересечения с графиком I и из точки пересечения проводим линию, параллельную оси абсцисс. В результате сразу определяем расход жидкой добавки (2,18%). Линию продлеваем в сектор II. В точке пересечения с графиком опускаем перпендикуляр на ось абсцисс и определяем расход твердой добавки (3,65%). Проводят контрольные формовки и вспучивание и сравнивают полученные результаты с расчётными.

## ВЫВОДЫ

Керамзитовый гравий является востребованным полуфабрикатом для изготовления стеновых материалов и конструкций, обладающих лучшими, по сравнению с тяжелым бетоном, теплофизическими показателями и меньшей плотностью. Наличие глин, обладающих нужными свойствами для получения керамзитового гравия, делает перспективным этот материал для использования в строительном комплексе Каракалпакстана. Разработанные основы методик подбора состава и прогнозирования коэффициента вспучивания керамзита могут быть использованы для решения практических задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Aleksey Zhukov, Andrey Medvedev, Alexey Poserenin and Boris Efimov*  
Ecological and energy efficiency of insulating systems 03070 // E3S Web of Conferences  
Volume 135 (2019) (ITESE-2019) Published online: 04 December 2019

2. Zhukov, A. D., Popov, I. I., Bessonov, I. V., & Chernukhin, S. P. (2021). Filled Heat Efficient Ceramics // Key Engineering Materials, May 2021 vol. 887, 493—498. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.493>
3. Пилипенко А.С., Каддо М.Б., Асаматдинов М.О., Турганбаев Б.Б. Теплая керамика на основе местного сырья Республики Каракалпакстан // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 86—91. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-86-91>
4. Василевская Н.Г., Енджиевская И.Г., Баранова Г.П., Дружинкин С.В. Основы технологии строительной керамики искусственных пористых заполнителей. Учеб.пос. Красноярск.: Сиб.федер.ун-т., 2019.-200 с.
5. Lizanaa J., Chacarteguib R., Barrios-Paduraa A., Valverdec J.M., Ortizc C. Identification of best available thermal energy storage compounds for lowto-moderate temperature storage applications in buildings. Materials de Construction, 2018.-Vol. 68.-№ 331.-p.1-39.
6. Kadyrova Z.R., Purkhanatdinov A.P., Niyazova Sh.M. Karakalpakstan Bentonite Clays - Perspective Raw Materials for Obtaining Ceramic Heat-Insulating Materials. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE).- 2020.-Volume-9.- Issue-8.-P.417—420.
7. Кадырова З.Р., Пурханатдинов А.П., Ниязова Ш.М. Физико-химическое исследование бентонитовых глин Каракалпакстана для получения керамических теплоизоляционных материалов. Новые огнеупоры, 2020, №8, С.3—5.
8. Zhukov A.D., Bobrova E.U., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissie B.A. Application of statistical methods for solving problems of construction materials science // Nanotechnologies in construction. 2020; 12 (6): 313–319. Article. Available from: Available from: DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319.

## ЛЕГКАЯ ШТУКАТУРНАЯ СИСТЕМА

А.Д. Жуков<sup>1</sup>, И.В. Бессонов<sup>2</sup>, Б.А. Демиссе<sup>3</sup>, Р.С. Поудел<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН),

<sup>1</sup>lj211@yandex.ru

<sup>2</sup>bessonoviv@mail.ru

<sup>3</sup>aregabekalu@gmail.com

<sup>4</sup>unlessmoney00@gmail.com

### Аннотация

Создание комфортных условий в помещениях является одной из основных задач современного строительства. В этом отношении могут рассматриваться как перцептивные легкие и теплоизоляционные штукатурные покрытия или фасадные штукатурные системы и легким наполнителем.

Фасадная система с наружным штукатурным слоем предусматривает нанесение первого шпаклевочного слоя на поверхность предварительно закрепленных теплоизоляционных плит, укладку и утепление армирующей стеклосетки, нанесение легкой штукатурки в один или два слоя толщиной до 30 мм каждый с промежуточным армированием стеклянной или полиэфирной сеткой; нанесение внешнего накрывочного (декоративно-защитного) слоя.

Система с применением фракционированного вулканического туфа в качестве мелкого заполнителя и тонкомолотого туфа в качестве активного компонента вяжущего обеспечивает устранение температурно-климатического воздействия на конструкции здания при одновременном снижении материалоемкости. Эта система повышает эффективность тепловой защиты, обеспечение стабильности теплофизических и физико-механических показателей штукатурного слоя на весь гарантированный срок его службы; обеспечение температурно-влажностного комфорта в помещении. Разработанная система позволяет снизить усадочные деформации в штукатурном покрытии в процессе его твердения.

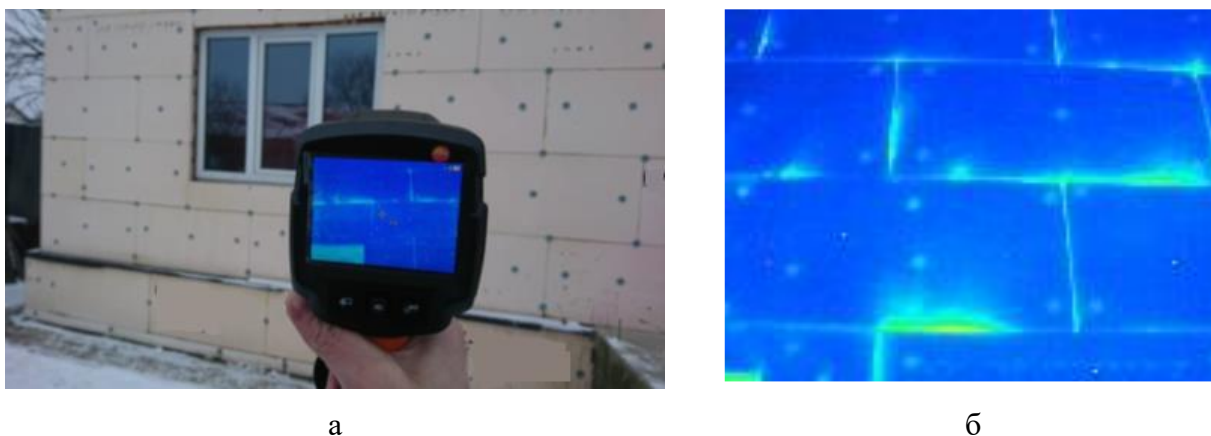
### ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая эффективность является комплексным понятием и включает группы оценочных показателей. В течение многих десятилетий приоритетным считалось достижение нормативных значений уровня термического сопротивления по глади стены, предположительно обеспечивающего экономию тепла в строительном комплексе широко внедрялись классические системы с утеплениемб фасадные, с вентилируемым пространством и пр.

Классические фасадные штукатурные систем с утеплением предполагают использование плотной теплоизоляции на основе минераловатных изделий или экструдированного полистирола [1–3]. Монтаж теплоизоляционных фасадных систем с наружным штукатурным слоем (СФТК) предусматривает крепление к стене здания теплоизоляционных плит (плиты из экструзионный пенополистирола или каменной ваты) при помощи клея и (или) механических фиксаторов (пластиковых дюбелей). Нанесение поверх теплоизоляционных плит одного или нескольких слоев базового штукатурного состава, из которых как минимум один слой имеет армирование. Финишное нанесение одного или нескольких декоративно-защитных слоев.

Недостатками этих систем является сложность конструкции, монтаж которой предполагает привлечение высококвалифицированных специалистов и наличие мостиков холода, снижающих термическое сопротивление по глади стены. Области повышенной теплопередачи формируются на поверхностях контакта теплоизоляционных плит и их

прилегания к несущим конструкциям, а также за счет теплопроводности элементов механического крепления (рис. 1). Отметим также, что за последнее десятилетие цена 1 м<sup>2</sup> подобной системы возросла в 6-10 раз, цена энергоресурсов — в 1,8–2 раза. Подобный дисбаланс делает проблематичным окупаемость подобных систем, то есть их рентабельность.



**Рис. 1.** Плитная изоляционная оболочка: а – тепловизионная съемка; б – «тепловые мостики»

При изоляции фасадных систем применение легких и «теплых» штукатурных покрытий обеспечивает комфортный микроклимат в помещении как в зимних условиях (сохранение тепла в помещении), так и жарком климате (препятствие проникновению тепла извне). Положительной также является возможность формирования бесшовных теплоизоляционных оболочек.

Главными критериями надежного использования легких штукатурок являются их средняя плотность, теплопроводность, способность затвердевания без внутреннего напряжения и образования трещин, а также их небольшой вес на единицу поверхности.

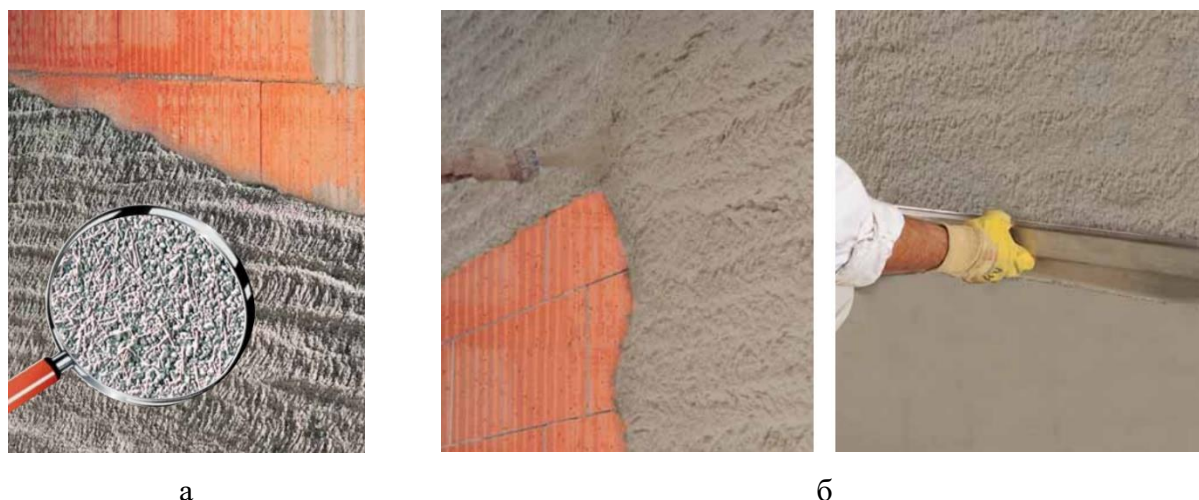
Системы теплых штукатурных покрытий начала развиваться в середине 90х годов. Основой этих систем являются сухие строительные смеси, содержащие легкий наполнитель (заполнитель): минеральный (вспученные перлит, а также техногенные гранулы, микросферы или капсулы) или синтетический (вспененный отсев полистирола). Легкие (теплоизоляционные) штукатурные составы входя в линейки продукции практически всех производителей сухих строительных смесей. Такие покрытия формируют защитную бесшовную оболочку, обладающую относительно низкой теплопроводностью, и могут наноситься слоями общей толщиной до 50 мм.

Минеральная армированная штукатурка с облегчающими добавками применяется для нанесения в качестве нижнего слоя с последующей накрывкой. Использование её рекомендуется в сочетании с теплоизоляционно-конструкционными блоками и камнями (Рис. 2).

Применение каждого из видов легкого (теплоизоляционного) наполнителя имеет определенные особенности [4–6]. Применение техногенных гранул, микросфер или капсул ограничено высокой стоимостью этих продуктов, а также небольшими объемами их производства. Использование вспененного отсева полистирола, во-первых, снижает огнестойкость штукатурного покрытия, а, во-вторых, применение материалов различной природы предполагает невысокую адгезию на поверхностях контакта «полимер-минеральная матрица», что отрицательно сказывается на долговечности.

Вспученный перлитовый песок имеет открытую пористость и, следовательно очень высокое водопоглощение (до 300%) и гигроскопичность. Необходимость введения большого объема воды предполагает на финишных стадиях твердения возникновение значительной капиллярной пористости и усадку материала. Пористость ведет к увеличению фильтрационных характеристик покрытия и, следовательно, увеличивает

опасность разрушения. Усадка ведет к дополнительному растрескиванию покрытия и увеличивает вероятность его отслоения от основания. Отметим также, что качественный перлит доставляется по импорту из Турции и Греции.



**Рис. 2.** Легкие штукатурки; армированная (а); с минеральными облепченными добавками (б)

Целью исследований, изложенных в статье, была разработка модельных теплых штукатурные покрытия должны обладать нормативными эксплуатационными характеристиками, но и изготавливаться на основе отечественного и доступно сырья негорючего, имеющего сравнительно низкую плотность и теплопроводность и обладающего хорошей адгезией к компонентам смеси и, в составе смеси, к элементам основы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование вулканического туфа (таблица 1) как в составе композиционного вяжущего (механоактивированный измельченный вулканический туф в композиции с портландцементом и эфиром целлюлозы), так и в самой штукатурной смеси (фракционированный наполнитель) позволяет во первых обеспечить оптимальное влагосодержание смеси, минимизировать усадку покрытия процессе её твердения, и стабилизированный тепло-влажноперенос в процессе эксплуатации системы, что положительно сказывается на ее эксплуатационной стойкости.

Таблица 1. Свойства вулканического туфа

Наименование показателя	Значения
Истинная плотность туфа, кг/м <sup>3</sup>	2400–2500
Средняя плотность туфа, кг/м <sup>3</sup>	700–900
Водопоглощение, % от массы	23–25
Морозостойкость, циклы	80–120
Прочность при сжатии, МПа	12–28
Теплопроводность, Вт/(м°С)	0,18–0,24
Коэффициент насыщения влагой	0,6–0,8
Коэффициент размягчения	0,7–0,9

Важным является также создание комфортных условий в помещениях за счет повышения термического сопротивления конструкции. Визуализация температурных полей в исследуемых конструкциях и системах изоляции проводилась с помощью компьютерной программы THERM (НИИСФ РААСН).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура тепловых полей показывает, что легкие штукатурные покрытия на основе вулканического туфа могут работать как при сильно отрицательных, так и сильно положительных температурах (рис.3). Это объясняется совместной «работой» вулканического туфа, используемого в качестве пористого (легкого) заполнителя и как компонента комплексного вяжущего, состоящего из портландцемента, тонкомолотого механоактивированного туфа и эфира целлюлозы [7–9].

На стадии твердения и набора прочности комплекс из молотого туфа и эфира целлюлозы сначала накапливает влагу, а потом постепенно отдает ее по мере гидратации цемента и снижения его влагосодержания, что способствует снижению усадки твердеющей системы; молотый вулканический туф при этом работает как активная добавка обладающая средней пуццолановой активностью и вступая в реакцию с портландитом с образованием гидросиликатов, которые становятся дополнительными центрами кристаллизации, что способствует формирования более плотного и прочного цементного камня .

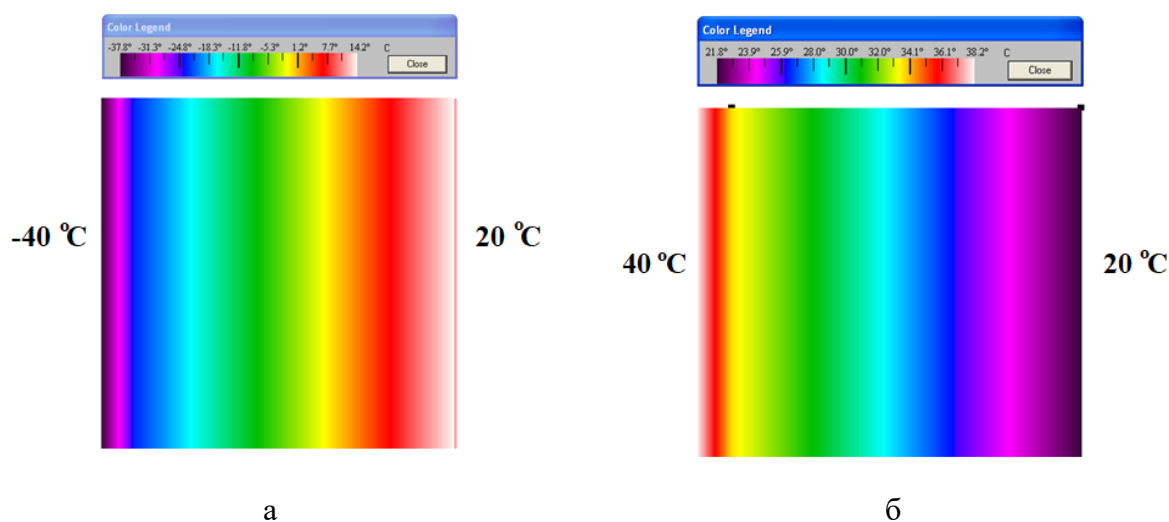


Рис. 3. Визуализация температурных полей в системах изоляции

В состав разработанной легкой штукатурной системы входят финишная и легкая строительные смеси и армирующая сетка из щелочестойкого стеклянного волокна. Состав легкой строительной смеси, масс. %: композиционное вяжущее — 42–46; мелкий фракционированный заполнитель — 24–28; остальное вода. Состав композиционного вяжущего, масс. %: портландцемент — 66–70; тонкомолотый вулканический туф — 29–33; эфиры целлюлозы — 0,8–1,2; рубленое щелочестойкое стеклянное волокно — 1,2–1,6. Состав мелкого заполнителя, масс. %: фракция 1,0–2,4 мм — 18–20%; фракция 1,0–2,4 мм — 18–20%; фракция 1,0–2,4 мм — 18–20%;

Фракционный подбор мелкого заполнителя обеспечивает его равномерное распределение по объему штукатурного покрытия более плотную упаковку в материале. Волокнистый наполнитель и армирование стеклянными или полиэфировыми сетками способствуют повышению прочности покрытия на изгиб и растяжение и препятствуют появлению трещин в процессе эксплуатации. В процессе эксплуатации затвердевшего штукатурного покрытия плотная цементная матрица с распределенным в ней фракционированным заполнителем и наполнителем способствуют достижению нормативных теплотехнических показателей легкой штукатурной системы и её эксплуатационной стойкости.

Структура легкого штукатурного покрытия не препятствует паропроницаемости, что обеспечивает удаление излишков влаги при понижении влажности окружающего воздуха



и способствует стабильной работе покрытия в условиях летнего нагрева и зимних заморозков.

## ВЫВОДЫ

Использование вулканического туфа как в составе композиционного вяжущего, так и в самой штукатурной смеси позволяет, во-первых, обеспечить оптимальное влагосодержание смеси, минимизировать усадку покрытия в процессе его твердения, и стабилизированный тепло-влажноперенос в процессе эксплуатации системы, что положительно сказывается на ее эксплуатационной стойкости.

Фракционный подбор мелкого заполнителя обеспечивает его равномерное распределение по объему штукатурного покрытия более плотную упаковку в материале. Волокнистый наполнитель и армирование стеклянными или полиэфировыми сетками способствуют повышению прочности покрытия на изгиб и растяжение и препятствуют появлению трещин в процессе эксплуатации. В процессе эксплуатации затвердевшего штукатурного покрытия плотная цементная матрица с распределенным в ней фракционированным заполнителем и наполнителем способствуют достижению нормативных теплотехнических показателей легкой штукатурной системы и её эксплуатационной стойкости.

Разработанное штукатурное покрытие может быть использовано как легкая штукатурная система, предназначенная для теплоизоляции внешних и внутренних сторон стен строительных конструкций из конструкционных материалов пониженной плотности: блоков ячеистого бетона, керамических пустотных камней, керамзитобетонных блоков и блоков из пенополистиролбетона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Баженова С.И., Конюхов М.А. Морозостойкость стен зданий из легкого бетона // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-4-9>
2. Жуков А.Д., Бессонов И.В., Кулапин А.В., Медведев А.А., Демиссе Б.А., Поудел Р.С. Фасадные штукатурные системы с применением модифицированного вяжущего // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 37–41. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-37-41>
3. Жуков А.Д. Энергетическая эффективность строительных систем / А.Д. Жуков, Е.Ю. Боброва, И.В. Бессонов, Е.А. Медникова. Монография. НИЦ ИНФРА-М. 2022 (по факту апрель 2022). С. 329. ISBN: 978-5-16-017479-2
4. Semenov, V.S., Bessonov, I.V., Zhukov, Zh.A., Mednikova, E.A., Govryakov, I.S. Thermal insulation systems for road bases with foam glass gravel // Magazine of Civil Engineering. 2022. 110(2). Article No. 11003. DOI: 10.34910/MCE.110.3
5. Муртазаев С.-А.Ю. Мелкозернистые бетоны на основе наполнителей из вторичного сырья: научное издание / С.-А.Ю. Муртазаев, Д.К.-С. Батаев, З.Х. Исмаилова. – М.: Комтехпринт, 2017. – 142 с.
6. Мешков П.И., Мокин В.А. Способы оптимизации составов сухих строительных смесей. // Строительные материалы. 2000. № 5. С.12–14.
7. Davood Mostofinejad, Seyed Mohammad Hosseini, Farzaneh Nosouhian, Togay Ozbakkaloglu, Bahareh Nader Tehrani Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment // Journal of Building Engineering. Vol. 29. 2020, pp 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101182>
8. Velichko, E., Shokodko, E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. MATEC Web of Conferences 251, 01042 (2018). <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101042>
9. Горбунов Г.И. Научные основы формирования структуры и свойств строительных материалов [Электронный ресурс]: монография/ Горбунов Г.И., Жуков А.Д.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016.— 555 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/49870>.— ЭБС «IPRbooks», по паролю ISBN: 978-5-7264-1318



# ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛАКА ПРИ ЕГО АКТИВАЦИИ В ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

С.В. Самченко<sup>1</sup>, М.А. Абрамов<sup>2</sup>, А.Б. Османов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>Ярославский Государственный Технический Университет,

<sup>1</sup>samchenko@list.ru

<sup>2</sup>abramovma@ystu.ru

<sup>3</sup>bust-05@mail.ru

## Аннотация

Целью работы является определение возможных изменений характеристик шлака при его одиночной и многократной активации в дезинтеграторной установке. Активация проводилась на дезинтеграторе ДСЛ-94 с энергией активации 17 кДж/кг. Исследования состояли из однократной, двукратной и трехкратной активации шлака в дезинтеграторе последующим определением физических характеристик шлака. В ходе исследования определено изменение удельной поверхности. Установлено, что второй проход шлака через дезинтеграторную установку дает увеличение удельной поверхности на 43%, а третий проход увеличивает удельную поверхность на 21% в сравнении со вторым проходом. Выявлено изменение насыпной плотности, а также пустотности шлака после многократной активации. Определено влияние идентификатора помола шлака, а также отмечено увеличение удельной поверхности шлака при активации с идентификатором помола в 7,7 раз в сравнении с обычной активацией шлака в дезинтеграторе.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение различных активных минеральных добавок в производстве многокомпонентных цементов позволяет решать широкий спектр вопросов, одними из которых являются снижение себестоимости готового цементного продукта, а также вопрос ресурсосбережения. Примером активной минеральной добавки является металлургический (дорожный) шлак [1-3].

Для повышения реакционной способности шлака применяется предварительная подготовка данного компонента, также называемая активацией. На сегодняшний день активация вещества насчитывает большое количество видов такие как: ультразвуковая активация [4,5], термическая активация [6], измельчение вещества в различных энергонапряженных аппаратах [7,8]. Наиболее простым способом активации является измельчение в различных энергонапряженных аппаратах, одним из которых является дезинтеграторная установка [9,10].

В процессе предварительной подготовки образуются новые поверхности, которые приводят к повышенной реакционной способности частиц активируемого материала [11]. Для повышения качества измельчения материала применяются различные идентификаторы помола, в качестве которых могут выступать поверхностно-активные вещества [10].

Целью работы является определение возможных изменений характеристик шлака при одиночной и многократной активации в дезинтеграторной установке.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки эффективности активации шлака использовался щебень из сталеплавильных шлаков с предварительным измельчением до фракции 0,63 мм. Химический состав шлака согласно паспорту представлен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав шлака в пересчете на оксиды.

Компоненты	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO	MgO
Количественный состав, %	62,75	20,10	8,72	1,99

В качестве интенсификатора помола применялась пластифицирующая добавка «Бетон Пласт 01Гипер».

Активация шлака проводилась на дезинтеграторной установке ДСЛ-94 с энергией механохимической активации 17 кДж/кг, путем загрузки исследуемого шлака в приемный бункер. Активация проводилась в один, два и три прохода с энергией активации 17 кДж/кг, 34 кДж/кг и 51 кДж/кг соответственно. Нанесение интенсификатора помола на исследуемый шлак выполнялось путем распыления поликарбоксилатной пластифицирующей добавки «Бетон Пласт 01Гипер» через мелкодисперсную форсунку IS-N.

Определение удельной поверхности проводилось методом воздухопроницаемости на приборе Товарова Т-3. Оптические микроскопические исследования частиц выполнялись на микроскопе Levenhuk D740T. Обработка результатов осуществлялась в программе ImageJ 1.53c.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе работы по многократной активации шлака в дезинтеграторной установке было отмечено увеличение удельной поверхности шлака (Рис.1), что обуславливается уменьшением размера частиц. Установлено, что второй проход шлака через дезинтеграторную установку дает увеличение удельной поверхности на 43%, а третий проход увеличивает удельную поверхность на 21%.

Стоит отметить, что активация шлака с интенсификатором помола увеличивает удельную поверхность в 7,7 раз в сравнении с активацией шлака без интенсификатора.

Данные результаты можно объяснить эффектом П.А. Ребиндера, а именно снижением адсорбционной прочности частиц шлака при проникновении поликарбоксилатного пластификатора в трещины и дефекты частиц в процессе измельчения в дезинтеграторе.

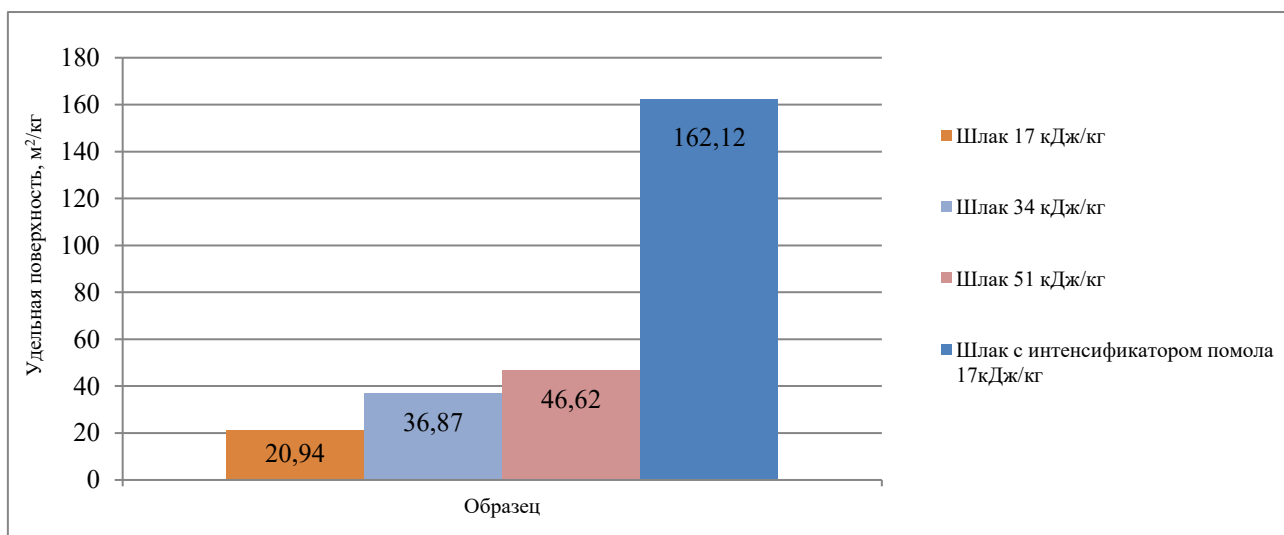
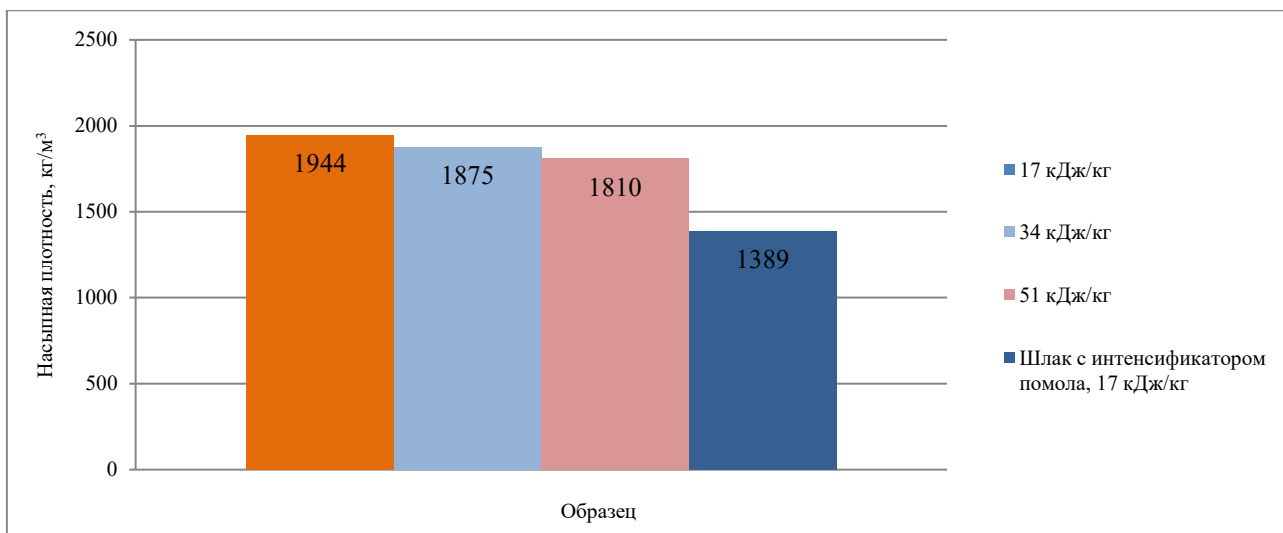
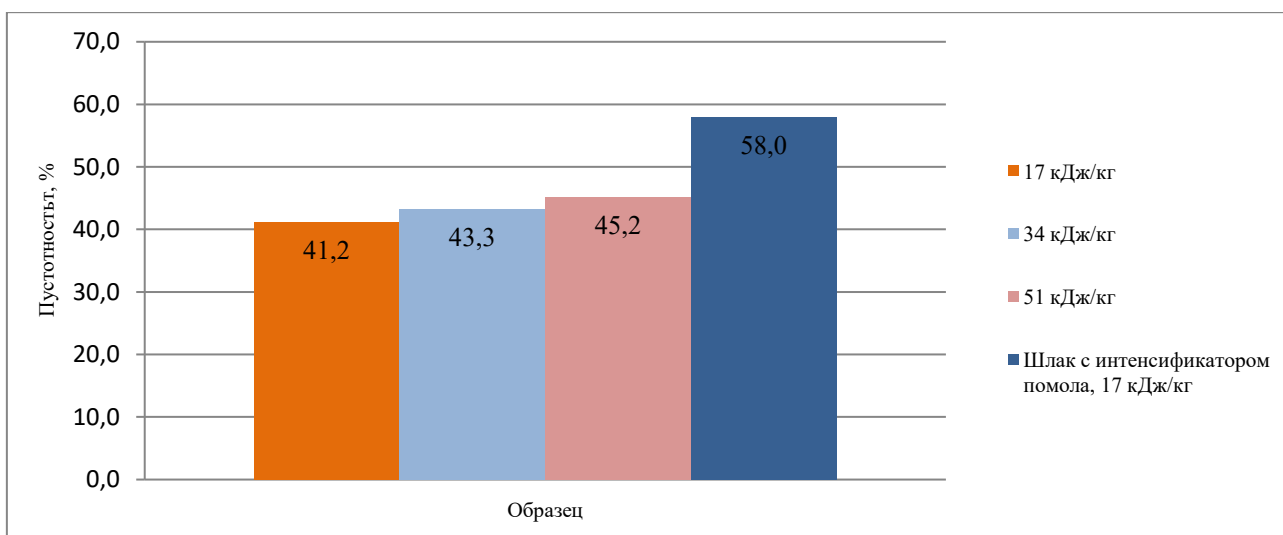


Рис.1. Изменение удельной поверхности частиц шлака с различной энергией активации.

При активации частиц шлака установлено изменение его насыпной плотности и пустотности (Рис.2, Рис.3).



**Рис. 2.** Изменение насыпной плотности частиц шлака после измельчения с различной энергией активации.

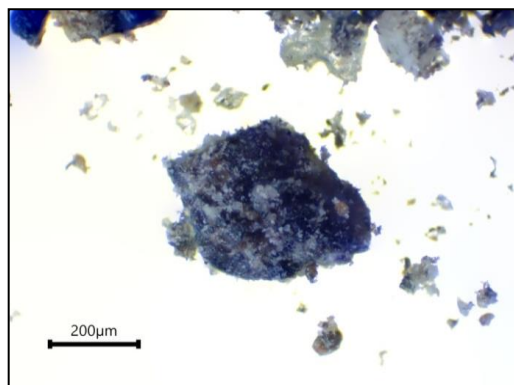


**Рис. 3.** Изменение пустотности частиц шлака после измельчения с различной энергией активации.

Увеличение пустотности активированного шлака связано с воздухововлечением, а следовательно, увеличением расстояния между частицами. С данным свойством также связано уменьшение насыпной плотности.

Стоит отметить увеличение пустотности частиц в 1,3 раза при активации шлака с интенсификатором помола в сравнении с активацией шлака без интенсификатора помола.

В процессе активации шлака происходит агрегирование частиц в связи с увеличением поверхностной и электростатической энергии данных частиц (Рис.4). Предполагается, что интенсификатор помола позволяет уменьшить агрегацию частиц путем образования поверхностной пленки на частицах.



**Рис. 4.** Агрегирование отдельных частиц шлака с энергией активации 17 кДж/кг без применения интенсификатора помола. Увеличение 4X.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что каждый последующий проход шлака через дезинтеграторную установку дает увеличение удельной поверхности примерно в 1,5 раза;
2. Активация шлака с интенсификатором помола «Бетон Пласт 01Гипер» увеличивает удельную поверхность в 7,7 раз в сравнении с активацией шлака без идентификатора, что связано с эффектом П.А. Ребиндера, а именно снижением адсорбционной прочности частиц шлака при проникновении поликарбоксилатного пластификатора в трещины и дефекты частиц в процессе измельчения в дезинтеграторе.
3. Увеличение пустотности активированного шлака связано с воздухововлечением, а следовательно, увеличением расстояния между частицами. С данным свойством также связано уменьшение насыпной плотности;
4. Отмечено увеличение пустотности частиц в 1,3 раза при активации шлака с идентификатором помола в сравнении с активацией шлака без интенсификатора помола.
5. Предполагается, что интенсификатором помола «Бетон Пласт 01Гипер» позволяет уменьшить агрегацию частиц путем образования поверхностной пленки на частицах;
6. С учетом полученного увеличения удельной поверхности в 7,7 раз, после измельчения с поликарбоксилатным пластификатором, представляется перспективным применения дезинтеграторной технологии для получения активных добавок из вторичного сырья в цемент;

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Классен В.К., Борисов И.Н., Мануйлов В.Е.* Техногенные материалы в производстве цемента// Международный журнал экспериментального образования. 2010. № 10. С. 80-81.
2. *Ломаченко Д.В., Шаповалов Н.А., Яшуркаева Л.И.* Влияние режимов сушки на степень измельчения шлака как активной минеральной добавки в процессе получения композиционного цемента//Вестник Белгородского Государственного Технологического Университета Им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С.146-148.
3. *Классен В.К.* Энерго-ресурсосбережение в производстве цемента//Современные наукоемкие технологии. 2004. №1. с. 58.
4. *Samchenko, S., Kozlova I., Zemskova O., Baskakova E.* Increase of aggregative and sedimentation stability of slag suspensions by ultrasound // (2019) E3S Web of Conferences. 110. статья № 01061. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001061.
5. *Samchenko, S., Kozlova, I., Zemskova, O., Zamelin, D., Pepelyaeva, A.* Complex Method of Stabilizing Slag Suspension // (2019) Advances in Intelligent Systems and Computing 983, с. 817-827. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8\_80
6. *Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С.* Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. №4(37). С. 85-99.
7. *Гуринович Л.С., Усов Б.А.* Механохимическая обработка строительных материалов // Экология и строительство. Scientific Research Center Of Environmental Engineering And Construction, 2015. Т. 3, № 3. С. 22.
8. *Гмызина Н.В.* Интенсификация процесса измельчения конвертерных шлаков//Вестник Магнитогорского

- Государственного Технического Университета Им. Г.И. Носова. 2009. №3(27). С.13-14.
9. M A Abramov , E G Stepanov, V B Dobrokhotov and E S Egorov Mechanochemical method for recycling construction industry waste//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1100 (2021) 012041 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1100/1/012041
  10. *Мурог В.Ю., Вайтхович П.Е., Боровский Д.Н.* Помольно-классифицирующие мельницы дезинтеграторного типа. Труды белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ, 2008, С113-117;
  11. *Mehrotra S. P., Alex T. C., Greifzu G., Kumar R.* Mechanical Activation of Gibbsite and Boehmite. New Findings and their Implications. Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015. 69(1). С. 51-59. doi: 10.1007/s12666-015- 0633-6.

## ТЕРМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕКУПЕРАЦИОННЫХ БИТУМОВ

Н.В. Хохлова, Н.И. Шестаков<sup>1</sup>, И.И. Титова, Н.В. Сячинова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ), 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д.40В, строение 1,

<sup>1</sup>Natalyahoh@bk.ru

<sup>1</sup>SHestakovNI@mgsu.ru

<sup>2</sup>ititova\_u@mail.ru

<sup>2</sup>c-h-v@mail.ru

### Аннотация

В статье рассматриваются характер изменения состава и структуры битумов, извлеченных из рулонных кровельных материалов с применением различных органических растворителей. Среди растворителей рассматриваются: технический керосин, трихлорэтилен, хлороформ и тетрахлорметан. Для изучения состава и структуры использовались метод синхронного термического анализа. По полученным результатам рассчитана энергия активации для различных составов извлеченных битумов. По результатам обработки ТГА и ДСК установлено, что наиболее термоустойчивый образец битума, извлеченный с применением трихлорэтиленом, менее устойчивый битум, извлеченный с применением керосина.

### ВВЕДЕНИЕ

Битумные вяжущие вещества, находящиеся в кровельных материалах постоянно подвержены воздействию УФ-излучения и многократным температурным перепадам, что в свою очередь активно стимулируют процессы старения. В результате этого, происходит перераспределение групповых структур битума, сопровождающиеся потерей низкомолекулярной фракции, поэтому битумные вяжущие теряют свою эластичность и приобретают хрупкость [1-3]. Тем не менее, их остаточные свойства, такие как гидрофобность и адгезия позволяют рассматривать их как вяжущее для строительства.

При выборе оптимальных режимов термической переработки рекуперационных битумов должны учитываться результаты оценки термической устойчивости содержащихся в них компонентов. Факторы, влияющие на их термическую устойчивость изучены недостаточно. Необходимо учитывать термическую устойчивость органических соединений, определяющую термическую стабильность (способность сохранять целевое вещество) во время термической обработки. Сложность выбора температурного режима возникают из-за недостаточного уровня проработки вопроса термической устойчивости, отсутствия классификации соединений. Одним из методов изучения термической стабильности является синхронный термический анализ.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является битум, извлеченный из кровельного материала (рубероида) сроком эксплуатации более 15 лет.

В качестве объектов исследования рассматривались 5 образцов, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Описание образцов рассматриваемых рекуперационных битумов

Маркировка образца	Описание
К	Контрольный образец битума, извлеченный термомеханическим способом
1	Рекуперационный битум, извлеченный с помощью технического керосина КТ-1
2	Рекуперационный битум, извлеченный с помощью трихлорэтилена ( $C_2HCl_3$ )
3	Рекуперационный битум, извлеченный с помощью хлороформа ( $CHCl_3$ )
4	Рекуперационный битум, извлеченный с помощью тетрахлорметана ( $CCl_4$ )

На базе НИУ МГСУ сделан синхронный термический анализ с помощью прибора синхронного термического анализа (ТГА /ДСК /ДТА) SDT Q 600 TA Instruments, который позволяет одновременно регистрировать изменения массы образца (термогравиметрический анализ) и процессы, сопровождающиеся выделением или поглощением тепла (дифференциальная сканирующая калориметрия /дифференциальный термический анализ) в широком температурном интервале.

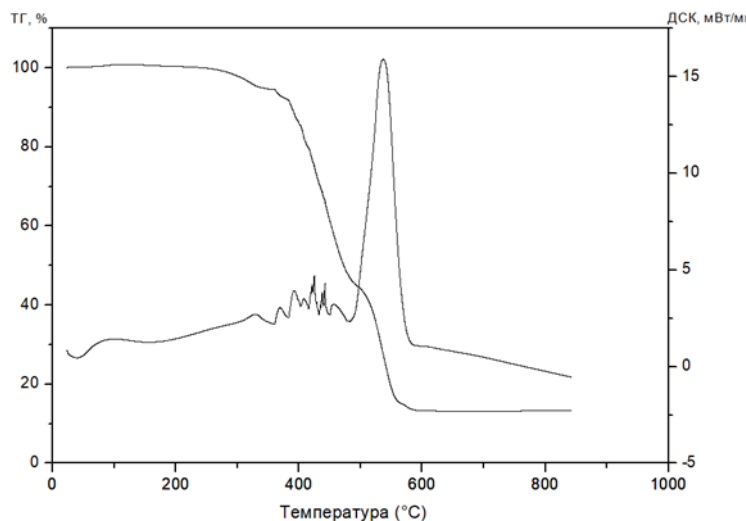


Рис. 1. Синхронный термический анализ контрольного образца битума (К)

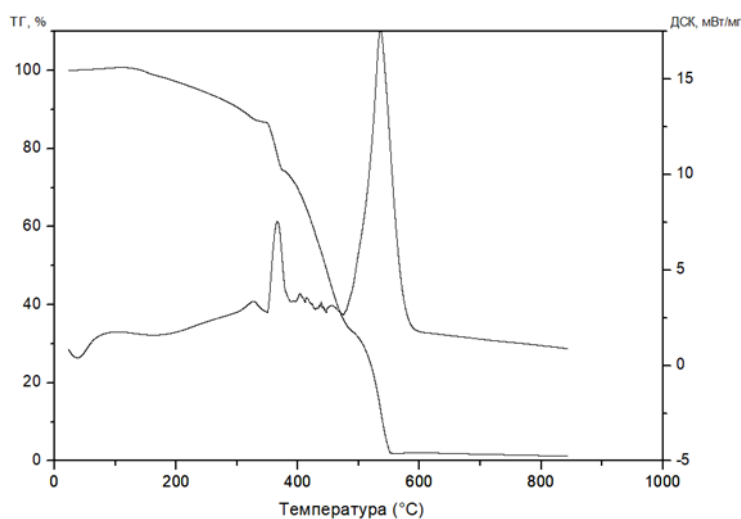
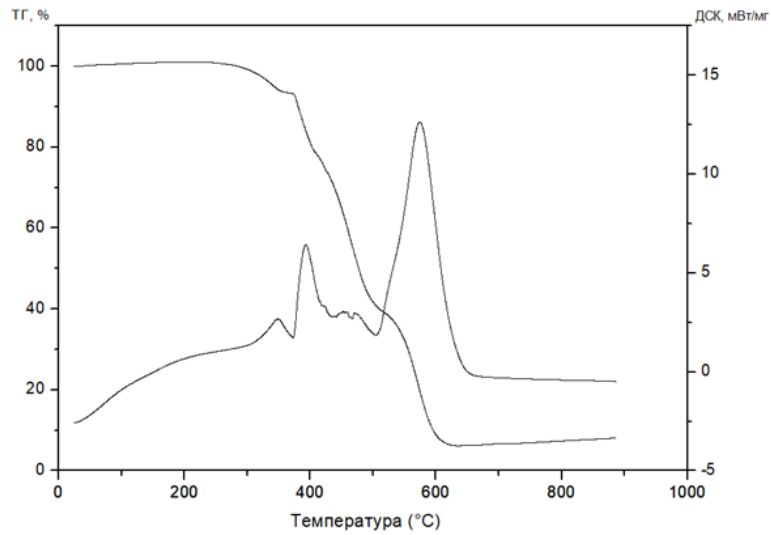
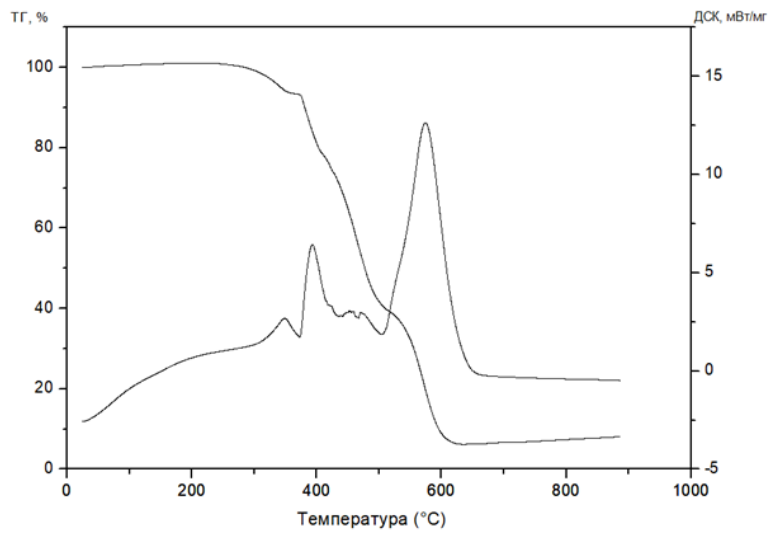


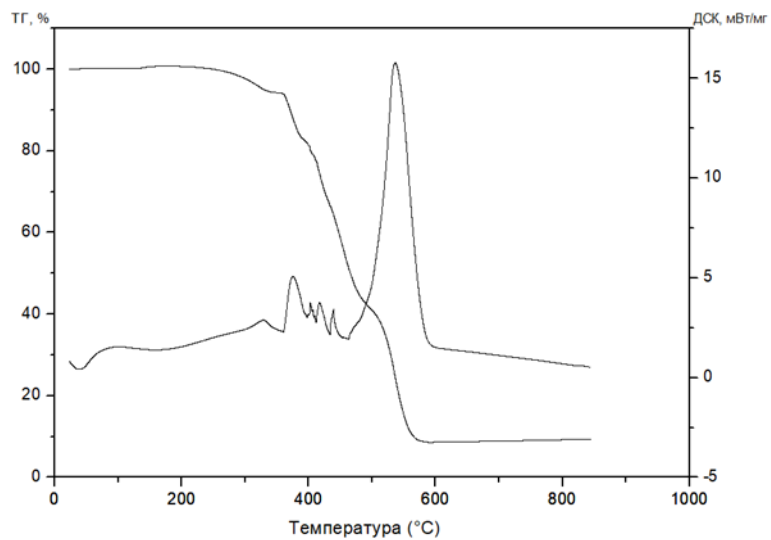
Рис. 2. Синхронный термический анализ образца 1



**Рис. 3.** Синхронный термический анализ образца 2



**Рис. 4.** Синхронный термический анализ образца 3



**Рис. 5.** Синхронный термический анализ образца 4



## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируя изменения, происходящие во всех исследуемых образцах битумов, и оценивая характер кривых ТГА и ДТА, было установлено, что термическое разложение изучаемых объектов происходит в три стадии. I стадия – проходит в области температур от 200 до 350°C; II стадия – от 300 – до 500°C и III стадия – от 460 до 600°C [4,5].

I стадия характеризуется экзотермическим максимум в температурном интервале 200-350°C. Потеря массы составила от 4,58 до 6,03%. Наибольшая потеря массы для битума, обработанного хлороформом, составила 12,31%, что скорее всего связано с более низкой температурой кипения растворителя по сравнению с другими (61,2°C).

II стадия имеет от 3 до 6 экзотермических максимумов в интервале температур 300-500°C. Потеря массы составляет от 6,85 до 55,83%. Количество аналитических пиков изменяется в зависимости от обработанных образцов: Контрольный Образец К – 6 пиков, образец №1 – 4 пика; образец № 2 и № 3 – по 4 пика и образец № 4 содержит – 3 пика.

Как видно из графиков наибольший эффект возгорания летучих веществ происходит у образца, обработанного хлороформом.

На этой стадии происходит процесс термического разложения образцов битума [6,7]. При температурах выше 400°C во всех образцах битумов начинают проявляться эндотермические эффекты, связанные с выделением газообразных продуктов. Наиболее активно этот эффект проявляется у образцов битума, извлеченного из рубероида с помощью тетрахлорметана.

Второй экзотермический максимум свидетельствует о самовозгорании летучих компонентов.

На III ступени наблюдается один экзотермический максимум в области температур от 460 – до 600°C. Потеря массы составляет от 71,97 до 87,06%. Для битума, обработанного хлороформом, потеря массы составляет 87,06%. На этой стадии происходят процессы окисления и полного сгорания образцов битума.

По значениям температуры, при которой наблюдается экзотермический максимум, соответствует окончательному термическому разложению образцов и процессу полного сгорания пробы, и образованию зольного остатка.

По максимальной температуре теплового эффекта можно сказать, что образец, обработанный трихлорэтиленом является более термоустойчивым по сравнению с другими [8].

По результатам ТГА-ДСК анализа исследуемых образцов свидетельствует о том, что термоокислительное превращения, характер кривых имеют различные количественные характеристики. Характер кривых ТГА-ДСК зависит от химической природы используемых органических растворителей.

По кривой ТГА для более выраженных экзотермических пиков были рассчитаны энергии активации, которые позволяют судить о прочности связей в таблице 2.

Многие физические и химические процессы связаны с переходом атомов или молекул из одного равновесного положения в другое. Например, образование вакансии в кристалле происходит благодаря переходу атома из положения в узле кристаллической решетки в междоузлие. При этом атом проходит некоторое промежуточное положение, в котором его энергия больше, чем в исходном состоянии. Для того чтобы проскочить это положение, атом должен иметь дополнительную энергию, равную разности его энергий в промежуточном и исходном состояниях. Эта энергия называется энергией активации.

В химии энергией активации называют минимальное количество энергии, которое требуется сообщить системе, чтобы произошла реакция. Процессы, характеризующиеся наличием энергии активации, называют термически активируемыми. Энергия активации  $E$  входит в уравнение Аррениуса, описывающее температурную зависимость кинетических характеристик термически активируемых процессов:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

где  $k$  – какая-либо кинетическая характеристика (скорость реакции, количество атомов, перешедших из одного положения в другое за единицу времени и т. п.),  $A$  – константа (пред экспоненциальный множитель),  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура.

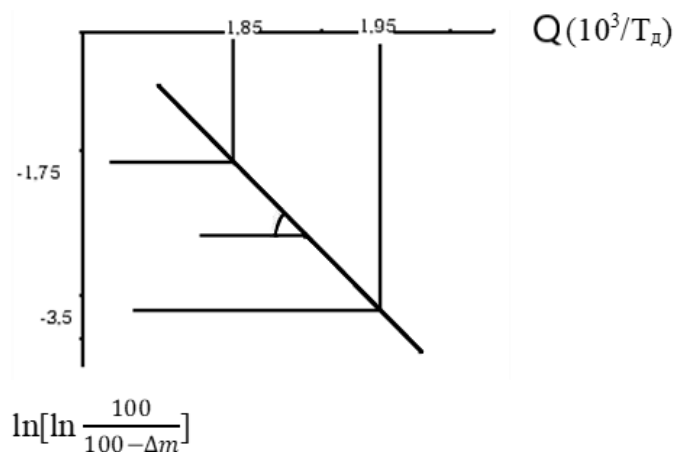
Величина энергии активации определяется природой веществ и характером протекающего процесса. Размерность энергии активации в уравнении Аррениуса – кДж/моль.

Для определения прочности связей была рассчитана энергия активации по уравнению Аррениуса (1) (методом двойного логарифма), по экспериментальным данным, где:  $T$  - температура при которой наблюдается значительное изменение массы, °С;  $W$  – потеря массы, %;  $W_t$  - конечная масса ступени, %;  $W_0$  - начальная масса образца на ступени, %;  $T_s$ - температура в средней точке ступени; разница между температурами  $T$  и  $T_s - Q$ , °С.

Для определения угла наклона строится графическая зависимость  $Q$  от  $\ln \ln$

$$\ln \ln = \frac{W_0 - W_t}{W - W_t} \quad (2)$$

По полученным данным проводится прямая и определяется тангенс угла наклона. Пример определения  $\text{tg} \alpha$  показан на рисунке. Для дальнейшего расчета энергии активации необходимо построить график зависимости двойного логарифма от величины обратной температуры, как указан на рисунке 6.



**Рис. 6.** Зависимость двойного логарифма от величины обратной температуры

Для выбранного участка рассчитывается  $\text{tg}\varphi$ :

$$\text{tg}\varphi = \frac{3.5 - 1.75}{1.95 - 1.85} = 17.5$$

Далее необходимо вычислить значение энергии активации.

$$E = R \cdot \text{tg}\varphi = 8,31 \cdot 17,5 = 145 \text{ кДж/моль.}$$

Таблица 2. Значения энергии активации

Номер состава	II пик				III пик			
	$T_0$	$T_{\text{max}}$	$T_{\text{кон}}$	$E_a$	$T_0$	$T_{\text{max}}$	$T_{\text{кон}}$	$E_a$
К	-	-	-	-	482	536	590	5,877
1	356	376	400	4,451	480	532	600	6,245
2	374	394	436	4,465	506	574	650	<b>6,455</b>
3	350	366	400	<b>4,816</b>	480	536	600	6,15
4	300	376	400	3,914	462	536	600	5,932

Где:  $T_0$  – температура, при которой начинается экзотермический процесс, °С;  $T_{\text{max}}$  – температура, при которой находится максимум экзотермического пика, °С;  $T_{\text{кон}}$  – температура, при которой заканчивался экзотермический процесс, °С;  $E_a$  – энергия активации, кДж/моль [9-10].

Известно, что энергия активации — это энергия разрыва химических связей. Чем больше энергия, тем прочнее химические связи [11].

По второй ступени можно сказать, что наиболее прочные связи находятся у образца, обработанного хлороформом, и составляет  $E_a = 4,816$  кДж/моль. Менее прочные у образца обработанным тетра хлорметаном  $E_a = 3,914$  кДж/моль.

Наиболее термоустойчивый образец битум, обработанный трихлорэтиленом, менее устойчивый битум, обработанный хлороформом.

При полном сгорании пробы наиболее прочные связи находятся у образца, обработанного трихлорэтаном  $E_a = 6,455$  кДж/моль. Менее прочные связи у необработанного образца  $E_a = 5,877$  кДж/моль

## ВЫВОДЫ

По данным исследования наиболее термоустойчивый образец битума, обработанный трихлорэтиленом, менее устойчивый битум, обработанный керосином, что объясняется различным строением агрегатов смолисто-асфальтовых веществ в рекуперационных битумах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Высоцкая М.А., Шеховцова С.Ю., Обухов А.Г., Есипова Ю.Ю. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 6 (58). с. 140-147.
2. Ткачев С.М. Иерархическая структура строения нефтяных остатков и битумов // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2006. – № 4. – С. 150 – 156
3. Ондар С. А, Солдуп Ш. Н., Михайленко М. А., Тасоол Л. Х. Исследование продуктов сверхкритической экстракции каменных углей Чаданского месторождения методами термогравиметрии и ИК-спектроскопии //Химия твердого топлива, 2019. № 2. С.10-14
4. Ермолаев Д.В., Мингалеева Г.Р. Определение термодинамических свойств битумов методом моделирования их структуры. Труды Академэнерго. 2008. № 4. С. 77-87.
5. Исраилова З.С., Страхова Н.А. Влияние термического воздействия на структуру и свойства нефтяных битумов // Естественные и технические науки. 2012. № 1 (57). С. 385-386.
6. Берг Г. Г. Введение в термографию // Наука. 1969. С. 396
7. Тейтельбаум Б. Я. Термомеханический анализ полимеров // Наука. 1979.С. 236
8. Уэндландт У. Термические методы анализа // Мир. 978. С. 526
9. Шестак Я. Теория термического анализа: Физико-химические свойства твердых неорганических веществ // Мир. 1987.С. 456
10. Кутянин Г.Н., Осташенко А.С., Исследование термостойкости коллагена дифференциальным термическим и термографическим методами. ДАН СССР.1971. №4.
11. Кондратьева В.Н., Энергия разрыва химической связи. Потенциалы ионизации и средство к электрону//Наука. 1974.

# ПРОИЗВОДСТВО ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКИ МЕТОДОМ ПОЛУСУХОГО ВИБРОПРЕССОВАНИЯ.

Л.Л. Макаров<sup>1</sup>, С.В. Прохоров<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87,

<sup>1</sup>levmakarov861524@gmail.com

<sup>2</sup>oc204@bk.ru

## Аннотация

В статье рассматриваются актуальные проблемные вопросы по производству тротуарной плитки методом полусухого вибропрессования, проведен обзор производственной линии, так же проанализированы используемые материалы. Дана оценка проблемного поля задач на производстве. Приведены результаты работ. Выяснили причины и последствия использования материалов тех или иных характеристик, реотехнологических свойств.

**Ключевые слова:** брусчатка, вибропрессование, модуль крупности, класс прочности, морозостойкость, матрица.

## ВВЕДЕНИЕ

С древних времен люди выкладывали дороги камнем для удобства перемещения между населенными пунктами и доставки различных товаров для торговли. С тех пор появились новые материалы такие как асфальт, бетон, тротуарная плитка и тд, и необходимость переросла в эстетические потребности, желание человека украсить площадь, улицу или пешеходную зону. Для удовлетворения подобных желаний прекрасно подходит тротуарная плитка, брусчатка. Сейчас наверное невозможно представить городские улицы, парки, скверы и дворики без брусчатки. Ее успех и распространенность заключается во многих качествах:

- Более дешевая альтернатива асфальту и безликим бетонным плитам.
- Большое количество различных конфигураций по форме и цвету.
- Удобоукладываемость.
- Ремонтопригодность.
- Эксплуатация возможна практически при любых условиях и тд.

Еще несколько лет назад потребитель был удовлетворен обычной тротуарной плиткой стандартных форм и серого цвета, но в настоящий момент увеличился спрос на что-то эксклюзивное с новой цветовой гаммой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с такой известностью брусчатки появляется и множество производств, среди которых приходится конкурировать. И даже при производстве самой обычной плитки возникает большой перечень вопросов и проблем. Рассмотрим производство классической серой брусчатки (размер не важен, толщина изделия 60мм)

Полноценное производство находится в г. Радужный. Производственная линия вибропрессования МЕТАЛКА (Сербия). Линия оборудована бункером (рис. 1) с 2 отсеками, из него в мешалку (рис. 2) отправляется по ленте песок, в ней готовится смесь и фиксируется влажность, далее смесь попадает в бункер вибромашины (рис. 3) посредством автоматической вагонетки, далее готовые, отформованные изделия попадают на лифт (рис. 4) и оттуда отправляются в камеру температурновлажностной обработки (рис. 5).



**Рис. 1.** Бункер.



**Рис. 2.** Мешалка.





**Рис. 3.** Матрица, виброустановка в сборе.



**Рис. 4.** Лифт.



**Рис. 5.** Камера ТВО.

Первое на что нужно обращать внимание – это материал: песок, цемент, вода и возможно какие-либо химические составы. Начав с песка, можно подумать, что тут все ясно, но песчаных карьеров существует огромное количество и материал из каждого будет иметь разные характеристики. Самые же важные показатели это класс по крупности, модуль крупности, содержание орг. примесей, глины и тд. Важно чтобы песок был крупным и однородным. Это существенно влияет прежде всего на прочностные характеристики изделия и конечно же меняется внешний вид, различные вкрапления сразу бросаются в глаза, на «мелком» песке поверхность гладкая, но прочность и расход цемента связи с этим нестабильны, «крупный» же песок дает однородную выразительную фактуру, стабильные прочностные характеристики.[1] На (рис. 6) представлен песок 1 с плотностью  $P=1800$  кг/м куб. и песок 2  $P=1550$ кг/м куб. Нельзя забывать, что песок зимой может замерзать или быть с большим количеством снега, так же не все карьеры работают зимой.





**Рис. 6.** Виды песка

Следующим важнейшим компонентом, который играет роль вяжущего вещества является- цемент. Мы используем Портландцемент **ЦЕМ I 42,5Н**. [2] Он в свою очередь тоже имеет множество разновидностей и физико-химических показателей: количество минеральных добавок, тип добавки, вид по составу, класс прочности на сжатие, скорость набора прочности и т.д. Первичным показателем конечно остается класс прочности, но стоит понимать, что кроется под этой характеристикой. Набор основной прочности протекает на протяжении 28 суток, но это не равномерный процесс. Поэтому производитель указывает «прочность цемента на сжатие в возрасте 2 и 28 суток. Конечно четких цифр не просчитать, поэтому на них есть определенные допуски. Стоит обратить внимание и на время начала схватывания. Так же есть химико-минералогические показатели клинкера, но они в большинстве своем не нормируются.

Так же многие производители добавляют различные химические составы, в нашем случае используется Муран БВА 19. Это водоредуцирующая добавка для бетонных и растворных смесей. Она повышает формуемость, уплотняемость, морозостойкость, качество лицевой поверхности, снижает расход цемента, высолообразование, налипание к оборудованию. Дозировка может быть разной, но средней цифрой можно назвать 0,4% от массы цемента, для качественного смешивания предварительно лучше смешивать с водой. [4]

Несмотря на хорошо подобранные материалы, возникают следующие проблемы.

- Влажность. Для стабильного качества она должна быть постоянной (мы придерживаемся 38%-39,5%). Но из-за нестабильности ее уровня в песке, трудно подобрать нужное количество воды, а вместе с ней и «химии». Высокая или низкая влажность чревата налипанием или плохой формовке изделий= большее количество брака. [2] Оптимальным решением стало установка **Hydronix**, с помощью этого устройства можно моментально отслеживать влажность смеси и держать ее в заданных границах. Чтобы проблему решить в корне, нужно иметь закрытый склад, где инертные материалы будут сохранять влажность на определенном уровне, независимо от внешних факторов. **ГОСТ 17608-91** «Плиты бетонные тротуарные» гласит, что для

изделий вибропрессования водоцементное отношение не должно превышать показателя 0,4. В случае нарушения соотношения будет происходить испарение воды, образование пустот и снижение прочностных характеристик.



**Рис. 7.** Брак из-за неверной влажности.

- ТВО. Она происходит в пропарочной камере. Самое главное в этом влажность не ниже 90%, ведь она напрямую влияет на такой процесс, как гидратация цемента, при котором молекулы воды соединяются с молекулами компонентов цемента. Температура здесь играет вторую роль, некоторые производители обеспечивают нужную влажность при «комнатной» температуре, так же зависит она от времени года. Важным является и выдержка изделий перед обработкой 2-3 часа, в ином случае появятся «паутинки» трещины на поверхности плитки (рис. 7). Необходимо обеспечить и плавный набор температуры. Этот этап позволяет получить отпускную прочность (минимум В22,5) уже на 2 сутки.[3]

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

По итогам всех проведенных мероприятий проводимых с февраля 2022 года по май того же года получены следующие результаты:

- попробовав работать на нескольких видах песка мы остановились Крапивинском карьере. Он подошел по всем показателям, имеет однородную структуру и что самое важное, положительно влияет на прочность изделий.
- достигли минимального количества брака. Осталась только та доля брака, что связана с различными техническими особенностями. В зависимости от конфигурации плитки очень важно подобрать режим вибропрессования изделия при подобранных составах.[6]
- Снизил расход цемента, при сохранении необходимой прочности. По испытаниям от 10.09.21 при 147кг цемента в замесе фактический класс бетона В40. А испытания от 16.05.2022 так же показали В40 при 110кг цемента, по ГОСТ 10060-2012 минимальный класс прочности для группы А является В22,5, поэтому снижение цемента продолжится.
- По ГОСТ 17608-2017[5]. для нашей климатической зоны необходима морозостойкость класса F200, по итогам испытаний от 11.05.2022 нужный класс был достигнут, конечно этих показателей достаточно, но в планах увидеть цифры и выше. [7]
- По оставшимся характеристикам наши изделия с запасом соответствуют требованиям ГОСТ.

N	Характеристике	Группа А	Группа Б	Группа В	Группа Г
1	Класс по прочности на сжатие, не менее	B22,5	B25	B30	B40
2	Класс прочности на растяжение при изгибе, не менее	Btd 3,2	Btd3,6	Btd 4,0	Btd 4,4
3	Марка по истираемости, не более	G3	G2	G1	G1
4	Минимальная толщина изделий, мм	40*	60*	80*	100*
5	Соотношение габаритов (Д/Т) **, не более	--	12*	4*	2*

**Рис. 8.** Характеристики по ГОСТ 17608-2017

## ВЫВОДЫ

На примере производства серой плитки толщиной 60мм рассмотрели основные направления подготовки. Чтобы получать плитку максимально возможного качества с низкой себестоимостью и минимальным количеством брака мало иметь качественные материалы, нужно всегда брать упреждение на огромное количество факторов такие как: время года, возможности и надежность поставщиков, периодичность и требовательность к обслуживаю, технические особенности оборудования, ответственный коллектив, квалифицированная ремонтная бригада, наличие необходимых запчастей, которые невозможно приобрести в короткие сроки и множество других важных мелочей.

Конечно имея связь с другими производителями можно предупредить некоторые проблемы, но многие вещи остаются сугубо индивидуальными и на поиски их решения может уйти немало времени, это большое количество опытных партий, реализация которых проблематична и может пагубно влиять на репутацию организации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8736- 2014 «Песок для строительных работ» 5с.
2. Ямских А. А., Ендживская И. Г. «ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ», Национальная ассоциация ученых (НАУ) # 57, 2020, [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_47499626\\_13641641.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_47499626_13641641.pdf).
3. Берг, О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона /О. Я. Берг. - М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с
4. Дворкин, Л. И. Эффективность различных способов повышения ранней прочности бетона нормального твердения с гиперпластификатором //Л. И. Дворкин, Ю. В. Гарницкий //Весь бетон. - 2010. - №12.
5. ГОСТ 17608-91«Плиты бетонные тротуарные» (Таблица 1 - Группы плит )
6. Гусев Б. В. Зазимко В. Г. Вибрационная технология бетона. К. Будивельник, 2010. 57 с.
7. ГОСТ 10060-2012. «Методы определения морозостойкости».





Основная задача заключается в создании у возводимого объекта цельного и непрерывного теплового контура. С этой целью необходимо подобрать необходимую толщину теплоизоляции [2]. Наличие «мостиков холода» приводит к охлаждению поверхности, которое имеет точечный характер, и, в результате чего, в этом месте может начинаться образоваться конденсат, который в дальнейшем может стать причиной возникновения грибков и плесени.

Основным и потому главным требованием к ограждающим конструкциям должно быть обеспечение их долговечности, нормативные сроки эксплуатации зданий и сооружений, имеющих капитальный характер должно составлять 50, 100 и 150 лет.

Однако, вопреки выше сказанному, современные материалы и изделия (минеральная вата, пенополистирол), используемые в качестве теплоизоляции и применяемые для тепловой защиты зданий и сооружений, не способны в полной мере обеспечить выполнения данных требований. Предприятия, занимающиеся изготовители таких эффективных теплоизоляционных материалов в сертификатах соответствия не указывают срок их службы при определённых эксплуатационных условиях, что является недопустимым, поскольку это может считаться обманом потребителя по причине несоответствия заявленных свойств продукции действительным.

В случае, когда происходят значительные температурные перепады наружного воздуха в летний и зимний периоды на северных территориях России с постоянным изменением положения точки росы в теле утеплителя, которое зависит от температуры воздуха снаружи, приводит к деструкции склеивающего компонента у минераловатных утеплителей, а также разрушение структуры у пенополистирола [3]. Помимо этого, при разрушении волокон плиты из минеральной ваты от попеременного замораживания и оттаивания происходит загрязнение воздушной среды города мелкодисперсными волокнами, которые склонны к витанию. Стеновые конструкции объекта с навесными вентилируемыми фасадными системами при низких значениях температуры, сильных ветровых нагрузках или же вынужденного прекращения подачи теплоносителя к зданиям в случае аварийных ситуаций быстро отдают тепловую энергию в окружающую среду, из-за чего могут возникать дискомфортные условия для проживания людей [4]. При сорбции плитой утеплителя влаги и её удерживания в теле материала может произойти образование грибков и плесени, которые опасны для здоровья человека. Кроме всего, перечисленного выше, в утеплителе могут завестись насекомые, грызуны и другие вредители, что в последующем приводит к разрушению материала. Эти экологические проблемы современных городов являются искусственно созданными человеком.

Проблема долговечности современной эффективной теплоизоляции должна подвергаться тщательному анализу, который заключается в привлечении внимания к ней ведущих научно-исследовательских и проектных институтов строительного направления. При этом требуется отойти от использования ведомственного и пробивного подхода к этому вопросу.

Переход от однослойных ограждающих конструкций на основе керамзитобетона с хорошей теплоёмкостью в северных районах к «передовым» навесным фасадным системам с применением эффективных теплоизоляционных материалов, а также их естественной вентиляции не будет иметь под собой ни технических, ни экономических обоснований, поскольку такая система не способна обеспечивать нормативных и расчётных времени эксплуатации капитальных зданий на сроки, близкие к ста годам.

Одним из недостатком применения керамзитового гравия в качестве теплоизоляционного материала является большая толщина его слоя, способная обеспечить выполнения им теплоизолирующих свойств, а также его невысокая морозостойкость и сравнительно небольшая прочность гранул относительно их средней плотности.

В новом списке полимерных изделий и конструкций, включая материалы, содержащих в своём составе полимерные соединения, которые могут быть допущены к применению их в строительной сфере, утверждённом 18 июня 2002 года, разрешается

применение пенополиуретана и пенополистирола в качестве теплоизоляции жилых и общественных зданий, которые обладают теплоизоляционными характеристиками, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика теплоизоляционных свойств для разных материалов

Материал	Плотность $\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м · °С	Толщина слоя, мм
Минеральная вата	20 - 40	0,048	100
Пенополистирол	10 - 50	0,038	40 - 150
Пенополиуретан	40 - 80	0,025	до 40

Однако на запрос проектно-изыскательского института ОАО «Якутагропромпроект» о использовании и гигиеническом качествам материалов на основе полимеров, такие как фенольнорезольного пенопласта, полиуретана или же пенополистирола директор ФГУН ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора, академик РАМН, профессор А.И. Потапов дал свой ответ в письме № 63-В/38 от 13.07.2011 года, что «применение фенольнорезольного пенопласта в строительных конструкциях жилых и общественных зданий не допускается, так как он выделяет ряд вредных для здоровья человека веществ – фенол, формальдегид, аммиак и другие, а при сгорании фенольнорезольного пенопласта, пенополиуретана, пенополистирола в воздушную среду выделяются формальдегид, аммиак, оксид углерода, непредельные углеводороды, которые оказывают неблагоприятное влияние на функциональное состояние органов и систем человека».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все эти проблемы, которые были изложены выше, можно решить за счёт введение в массовое производство изделий из бетона на лёгком заполнителе, представленном в виде пеностекольного щебня на рисунке 2.



Рис. 2. Структура пеностекольного щебня

Пеностекольный щебень относится к экологически чистым продуктам переработки боя из стекла [5]. Этот материал имеет низкие показатели водопоглощения, высокие значения морозостойкости и теплового сопротивления, а также довольно высокое значение прочности на сдвливание в цилиндре по сравнению со своей низкой плотностью (таблица 2).

Таблица 2. Физико-механические характеристики пеностеклянного щебня

Характеристика	Значения
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	100 - 240
Коэффициент теплопроводности, Вт/м ·°С	0,062 - 0,08
Группа горючести	НГ
Диапазон рабочих температур, °С	от – 200 до + 550
Прочность на сжатие, МПа	35 – 198
Водопоглощение при полном погружении в воду на 28 суток, % по массе, не более	4,0
Морозостойкость	F100

Важным требованием при возведении жилого и общественного здания должно быть то, что его необходимо спроектировать и построить таким образом, чтобы в течение всего срока его эксплуатации не возникало причин угрозы для жизни и здоровья находящихся или проживающих в нём людей по причине воздействия на них физических, химических, биологических и иных вредных факторов внутренней среды помещения. Выполнения этого условия по большей части зависит от качества применяемых при строительстве материалов и изделий.

То, что этот материал способен хорошо воспринимать внешнее воздействие при своём небольшом весе, является очень важным показателем для строительства на северных территориях страны, поскольку возводимые здания и конструкции должны оказывать небольшие нагрузки на основание по той причине, что грунт в районах Сибири в значительной степени является заболоченным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Однако и у этого материала имеются некоторые недостатки, которые могут ограничивать сферу его применения в качестве лёгкого заполнителя для бетона. К одному из ограничений относится то, что у щебня из пеностекла отличается по своему химическому составу от любого другого применяемого заполнителя для бетона, а именно преобладающим содержанием SiO<sub>2</sub>, который является реакционноспособным [6]. Эта причина может привести к проявлению щелочно-силикатной коррозии цементного камня и разрушению его структуры [7]. Однако решение этой проблемы изложены в СНиП 2.03.11-85, в котором прописано, что для бетонов, содержащие в своём составе заполнитель, способный вступать в реакцию с цементом, рекомендуется применять следующие меры:

- использовать небольшое количество цемента;
- изготавливать бетон на цементах с низким содержанием щелочей;
- применять добавки к цементу, снижающие концентрацию щелочей в цементе;
- вводить гидрофобизирующие и газовыделяющие добавки и др.

Ещё одним недостатком, с которым можно столкнуться при производстве железобетонных конструкций с применением в качестве пористого заполнителя пеностеклянного щебня, является использование преимущественно малой густоты армирования изделий, а также ограничения в возможности применения различных видов бетонных смесей, поскольку пеностеклянный щебень производят в основном фракцией не менее 20 мм и при попытке его измельчения до меньшего размера зёрен приводит к образованию огромного количества отсева в количестве до 60% по массе материала, который на данный момент не может быть каким-либо образом применён.

По этой причине необходимо подобрать такое оборудование и способ дробления, чтобы измельчение этого материала происходило не при процессе его раздавливания, а за счёт раскалывания зёрен пеностеклянного щебня.

## **ВЫВОДЫ**

Для достижения эффективной работы утеплителей в суровых условиях их эксплуатации на территории Крайнего севера играет большое значение физико-механические, а также эксплуатационные свойства выбранного материала.

Приведённые в работе пути расширения сферы в сторону применения щебня на основе пеностекла не только в качестве засыпной теплоизоляции, но и возможность производить на его основе различные бетонные смеси, такие как литые, указывает на то, что этот материал определённо обладает большой возможностью его последующего применения и широкого ассортимента строительных конструкций различных конфигураций. Всё это приводит к увеличению общего качества строительной сферы, так как такой материал имеет широкий спектр преимуществ, которыми способен выделиться не каждый теплоизоляционный материал, а именно своей негорючестью, негигроскопичностью и стойкостью к различным средам.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Местников А.Е.* Северное жилище: энергосбережение, безопасность // Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. 168 с.
2. *Шкловер А.М.* Теплопередача при периодических воздействиях // М.-Л.: Госстройиздат, 1961. 160 с.
3. *Никитина Л.М., Тимошенко А.Т., Попов Г.Г.* Эффект повышения теплоустойчивости легких ограждающих конструкций при сочетании утеплителей // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 6. С. 99-103.
4. *Богословский В.Н.* Тепловой режим здания // М.: Стройиздат, 1979. 248 с.
5. *Кетов А. А.* Перспективы пеностекла в жилищном строительстве // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 79-80.
6. *Саулин Д. В., Рожкова А.В.* Исследование щелочесиликатного взаимодействия пеностекольных наполнителей с цементным вяжущим // Вестник ПНИПУ. 2017. С. 89 – 105.
7. *Кетов А. А., Толмачев А. В.* Пеностекло - технологические реалии и рынок // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 17-23.



## ЗДАНИЯ С БЕСШОВНОЙ ИЗОЛЯЦИОННОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Б.А. Ефимов<sup>1</sup>, К.А. Тер Закарян<sup>2</sup>, И.В. Бессонов<sup>3</sup>, Е.Д. Михайлик<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>ТЕПОФОЛ ООО,

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ РААСН),

<sup>1</sup>*boris.alexandr.efimov@gmail.com*

<sup>2</sup>*karo73@mail.ru*

<sup>3</sup>*bessonoviv@mail.ru*

<sup>4</sup>*Mihailik1999@list.ru*

### Аннотация

Каркасные и бескаркасные системы на основе металлических конструкций используют при строительстве промышленных зданий, складских помещений, помещений для содержания скота, в крытых парковках и т.д. во всех случаях значимым является использование изоляционных оболочек, позволяющих сформировать в помещениях требуемый температурно-влажностный режим.

Вспененный полиэтилен и изделия на его основе в условиях реализации бесшовной изоляционной оболочки позволяют формировать эффективные системы тепло- гидро- и пароизоляции объектов, используемых практически во всех областях строительного комплекса и инженерных системах, работающих при температурах до 80 °С.

Эффективность бесшовной изоляционной оболочки из пенополиэтилена настолько высока, что при энергосберегающем остеклении и использовании сопутствующих архитектурных и инженерных решений (рекуперация воздуха и пр.) возможно создавать сооружения с энергопотреблением приближающимся к нулевому. Материалы AirLayer имеют меньшую теплопроводность по сравнению со слоистыми материалами, изоляционные оболочки лучшие теплотехнические показатели.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы изоляции зданий, сооружений или хозяйственных объектов ориентированы на обеспечение двух определяющих задач: создание и поддержания требуемого температурно-влажностного режима в помещении, а также обеспечение условий для максимальной функциональной пригодности изоляционной оболочки и долговечности конструкции в целом. В зависимости от условий эксплуатации конструкции задачи могут уточняться: например, снижение тепловых потерь из помещения, поддержание в нем комфортного микроклимата; поддержание требуемых технологических параметров в помещении и на объекте, а также сохранение холода [1–3].

Сохранение холода является важным требованием для многих условий эксплуатации. Во-первых, это имеет отношение к холодильным агрегатам, в частности, и к криотехнике в целом. Во-вторых, это связано с необходимостью поддержания температурного режима в спортивных ледяных сооружениях: катках, ледовых стадионах и пр. существуют и менее известные области, разговор о которых пойдет ниже. В-третьих, поддержание температур близких к 0–5 °С необходимо в хранилищах сельхозпродукции.

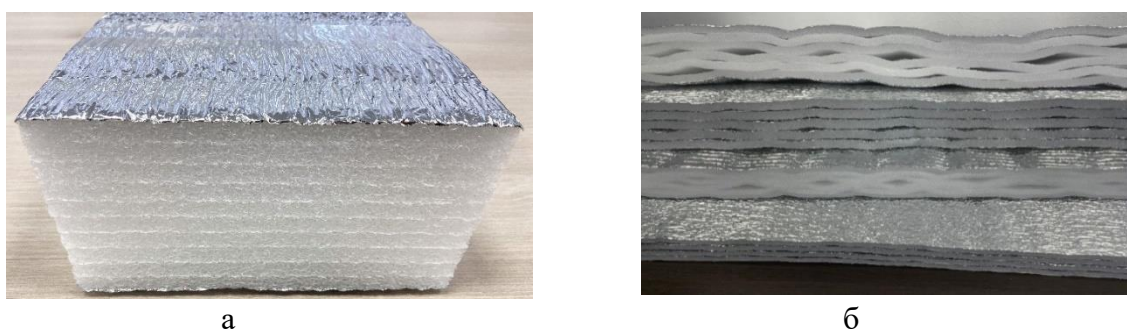
Эксплуатация объектов работающих при температурах близких к 0 оС (и ниже) предполагает использование изоляционных материалов, к которым предъявляется ряд специальных требований. Во-первых, низкая теплопроводность, стабильная в условиях влажностного воздействия, отрицательных температур, а также температур, проходящих через область конденсатообразования (так называемых температур «точки росы»). Во-вторых, это низкая паро- и водопроницаемость материалов. В-третьих, возможность формирования изоляционных оболочек с минимизацией теплопроводных зон (так называемых «мостиков холода») и зон свободной фильтрации воздуха.

Этим условиям соответствуют изделия на основе пенополиэтилена: маты и рулонные материалы. Технология, разработанная компанией ТЕПОФОЛ, позволяет получать изделия толщиной от 10 до 200 мм (а при необходимости и более), а при монтаже формировать бесшовные изоляционные оболочки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изделия на основе пенополдиэтилена (маты, рулоны) изготавливают с отражающим покрытием (фольга, металлизированная пленка или лавсан) или без покрытия. Внедрение в производство технологии ТЕПОФОЛ сделало возможным изготовление слоистых изделий

Классической тип, это слоистые изделия с плотным прилегание слоев (рис. 1). Технологические приемы, лежащие в основе получения подобных изделий основаны на послойном спекании листов пенополиэтилена, толщина каждого из которых равна 10-12 мм, а в результате можно изготавливать элементы толщиной до 200 мм. Развитие данной технологии позволило получать слоистые изделия с точечным соединением слоев (патент РФ № 199048) [4]. Линейки материалов получила название AirLayer. AirLayer это рулонные изделия или маты, содержащие плоские слои вспененного полимера (полиэтилена, полипропилена или каучука) с сохраняющимися воздушными полостями между отдельными листами. В зависимости от условий применения ширина рулонов пенополиэтилена может быть до 2 м, а длина материала изготавливается под размер заказчика. По сторонам рулонов формируется кромка, позволяющая формировать замковое соединение.



**Рис. 1.** Изделия из пенополиэтилена: а – слоистые изделия; б – изделия линейки AirLayer

Технология монтажных работ ТЕПОФОЛ основана на механическом закреплении листов на несущих элементах конструкции (каркасе деревянном или металлическом, монолите, профилированном оцинкованном металле) и формировании бесшовной изоляционной оболочки (патент РФ № 2645190) [5]. Бесшовная изоляционная оболочка формируется следующим образом: отдельные листы вспененного полимера (толщиной от 40 до 200 мм) соединяют в замок и сваривают строительным феном. В результате сваривания двух рулонов при температуре 110–120 °С получается сплошное бесшовное полотно.

Основные свойства пенополиэтилена и изоляционных оболочек на основе пенополиэтилена исследовались в соответствии с требованиями действующих в России стандартов. Учитывая то, что вспененный полиэтилен имеет низкую теплопроводность, а также паро- и водопроницаемость в бесшовных системах достигается полная изоляция по всем трем параметрам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эластичная изоляционная оболочка деформируется вместе с основанием (с деревянным или металлическим каркасом или профилированными листами в бескаркасных системах). Это приводит к тому, что оболочка в процессе эксплуатации испытывает растягивающие

нагрузки, обусловленные, в первую очередь, температурными деформациями несущих конструкций. Для сохранения целостности изоляционной оболочки является важным сопротивляемость материала растягивающим напряжениям, а также надежность сварного соединения между отдельными изоляционными полотнищами (листами, рулонами).



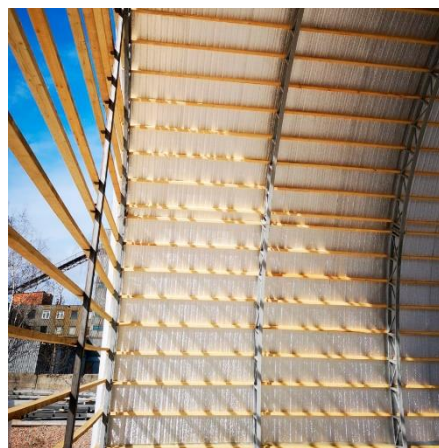
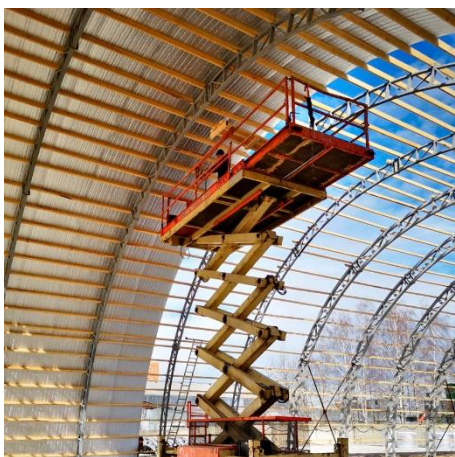
**Рис. 2.** Определений прочности при растяжении (в том числе по сварному шву) в продольном направлении образцов вспененного полиэтилена

Испытания прочности при растяжении в продольном направлении проводили в соответствии со стандартом «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения прочности при растяжении параллельно лицевым поверхностям» (рис. 2). Оценка свойств проводилась без учета и с учетом искусственного старения изоляционных элементов на основе пенополиэтилена.

Прочность на разрыв при растяжении в продольном направлении для изделий из пенополиэтилена с металлизированным покрытием составляет 80–92 кПа, без металлизированного покрытия — 80–87 кПа. Прочность на разрыв по сварному шву составила 29–32 кПа. Искусственное состаривания заключалось в выдержке изделий в течении 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Эксперимент показал, что снижение прочности на разрыв не превысило 8–10 %. Полученные результаты вполне соответствуют требованиям, предъявляемым к элементам конструкций, работающих в климатических условиях средне полосы РФ, а также полярных территорий.

Отметим, что при отрицательных температурах пенополиэтилен дает усадку в пределах 6–9%, обусловленную замерзанием паров воды в ячейках материала. Пар, содержащийся в ячейках при отрицательных температурах, выпадает в виде инея на внутренних поверхностях ячеек, а это в свою очередь приводит к созданию в ячейках отрицательного давления (соответственно к усадке материала). Сухой воздух, оставшийся в в ячейках, способствует снижению теплопроводности оболочки на 10–12%,

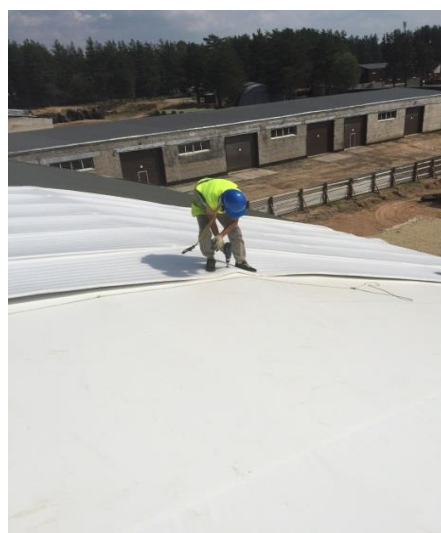
Конструкции с применением бесшовных оболочек на основе пенополиэтилена опробованы в малоэтажном коттеджном строительстве, при изоляции каркасных и бескаркасных зданий и сооружений, в системах плавающего пола, на плоской и скатной кровле. Основными критериями эффективности подобных систем являются комфортность (или технологичность) помещений, а также снижение потерь тепла.



**Рис. 3.** Изоляция ангаров

Сегменты хозяйства, где используются системы бесшовной изоляции из пенополиэтилена это жилищное и промышленное строительство, строительство сельскохозяйственных объектов. Системы изоляции с применением пенополиэтилена с бесшовным соединением хорошо зарекомендовали себя при изоляции гаражей, складов сельхоз продукции и животноводческих объектов (рис. 3, 4) [6, 7].

В рассматриваемых системах можно выделить свойства, характерные для всех типов объектов и частные, выполнение которых необходимо для решения конкретных эксплуатационных задач. При всех вариантах применения бесшовные изоляционные оболочки обеспечивают защиту конструкций от атмосферных нагрузок, а, следовательно обеспечивают их долговечность, а также обеспечивают оптимальный расход энергетических ресурсов. В жилых зданиях и животноводческих объектах основным является поддержание комфортного микроклимата как при отрицательных наружных температурах, так и в условиях жары. В складах сельскохозяйственной продукции важным является поддержание температурно-влажностного режима, обеспечивающих сохранение этой продукции (как правило,  $+3-5$  °С при влажности 55–60%). В крытых ангарах (гаражах) для хранения (парковки, консервации) техники основным является создание условий для безремонтной эксплуатации машин и механизмов.

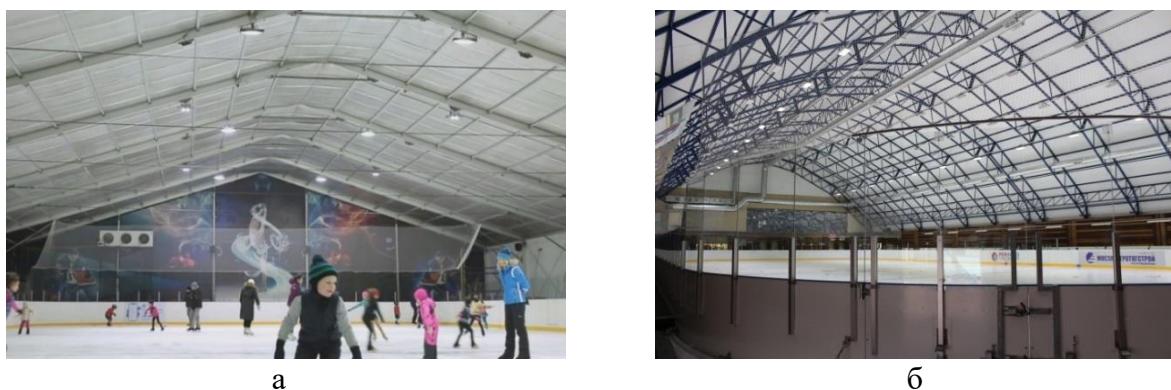


**Рис. 4.** Монтаж тентового покрытия по слою рулонного пенополиэтилена

Существует также группа зданий и сооружений, в которых энергетическая эффективность изоляционных оболочек проявляется как в поддержании технологичности внутренней среды объекта, так и в оптимизации затрат на сохранение холода. Технология «сохранения холода» реализуется при формировании изоляционных оболочек



специализированных складов и хранилищ, в криотехнике, при изоляции крытых спортивных сооружений, а также в полевых условиях для консервации снега.



**Рис. 5.** Система изоляции крытого катка (а) и ледовой арены (б)

Планирование и строительство каркасных сооружений с площадками из искусственного льда (рис. 5) представляет собой весьма сложную задачу. В современных ледовых дворцах сегодня имеются две системы встроенных труб: охлаждающие трубы и тепловые системы. Так же обязательна приточно-вытяжная вентиляция, обеспечивающая поступление свежего воздуха. Задачи изоляционной оболочки: во-первых, создание комфортного режима для пользователей и во-вторых, снижение энергетических затрат на поддержание льда в эксплуатационном состоянии за счет снижения теплопотерь через элементы конструкции.

## **ВЫВОДЫ**

Вспененный полиэтилен и изделия на его основе в условиях реализации бесшовной изоляционной оболочки позволяют формировать эффективные системы тепло- гидро- и пароизоляции объектов, используемых практически во всех областях строительного комплекса и инженерных системах, работающих при температурах до 80 °С. Низкая паропроницаемость и практически нулевой водопоглощение пенополиэтилена позволяет обеспечивать стабильные теплофизические характеристики материала при различных условиях эксплуатации.

Эффективность бесшовной изоляционной оболочки из пенополиэтилена настолько высока, что при энергосберегающем остеклении и использовании сопутствующих архитектурных и инженерных решений (рекуперация воздуха и пр.) возможно создавать дома с энергопотреблением приближающимся к нулевому. Материалы AirLayer имеют меньшую теплопроводность по сравнению со слоистыми материалами, изоляционные оболочки лучшие теплотехнические показатели.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ter-Zakaryan K. Ar., Zhukov Al. D., Short Overview of Practical Application and Further Prospects of Materials Based on Crosslinked Polyethylene, In: Thomas J., Thomas S., Ahmad Z. (eds) Crosslinkable Polyethylene. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Springer, Singapore, 2021 [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_12)
2. Ter-Zakaryan K. A., Zhukov A. D., Bobrova E. Yu., Bessonov I. V., Mednikova E. A. Foam Polymers in Multifunctional Insulating Coatings // *Polymers*. 2021, 13(21), 3698; <https://doi.org/10.3390/polym13213698>
3. Ter-Zakaryan, K.A.; Zhukov, A.D.; Bessonov, I.V.; Bobrova, E.Y.; Pshunov, T.A.; Dotkulov, K.T. Modified Polyethylene Foam for Critical Environments // *Polymers* 2022, 14, 4688. <https://doi.org/10.3390/polym14214688>
4. RU Patent No. 2645190 Lock technology of thermal insulation material for seamless welding of connecting locks. registered on February 16th, 2018
5. RU Utility patent No.199048 Thermal insulating multi-layer material registered on August 2021.

6. Aleksey Zhukov, Irina Stepina and Sofia Bazhenova. Ensuring the Durability of Buildings through the Use of Insulation Systems Based on Polyethylene Foam. *Buildings* 2022, 12(11), 1937; <https://doi.org/10.3390/buildings12111937> - 10 Nov 2022
7. Semenov V.S., Bessonov I.V., Ter-Zakaryan K.A., Zhukov A.D., Mednikova E.A. Energy-Saving Seamless Insulation Systems for Frame Buildings Using Foamed Polyethylene // *Regional energy problems (Problemele energeticii regionale)*. Electronic edition. Chisinau, 2020, No. 4, DOI: 10.5281/zenodo.4018999 UDC: 691.175.2./6./8

## ИНЪЕКЦИОННЫЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ АКТИВНЫХ ВОДОПРОЯВЛЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

М.М. Мирзоян, А.И. Панченко, И.Я. Харченко, В.В. Воронин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,  
*mirzoyan.mihran@bk.ru*

### Аннотация

Статья содержит сведения о разработке цементной инъекционной смеси, предназначенной для пропитки трещиноватых горных пород с высоким коэффициентом фильтрации. Разработанная цементная инъекционная смесь, включает следующие компоненты: портландцемент, воду и добавки в виде ортофосфата натрия  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (ФН) и силикат натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Введение ФН необходимо для регулирования сроков структурообразования портландцемента, а силиката натрия для ускорения его схватывания. Оптимизация состава смеси с помощью математического метода планирования эксперимента позволила установить расход фосфата натрия (около 4% от массы смеси) при расходе силиката натрия 10% от массы цемента, обеспечивающие требуемое время структурообразования 80-110 мин и требуемую вязкость смеси с  $\text{В/Ц} = 0,5$  для пропитки грунта с последующим быстрым запустеванием и твердением после завершения нагнетания.

В настоящее время в отечественной и международной практике принято ликвидировать течи через структуру трещиноватых горных пород с шириной трещин более 0,3 мм с коэффициентом фильтрации около 30 м/сут. путем цементации, целью которой является заполнение трещин твердеющим цементным раствором [2;4;5;6;15]. Однако решить эту проблему очень часто полностью не удается. Объясняется это тем, что для цементации применяют высокоподвижные растворные составы в виде инъекционных смесей со значительным водоцементным отношением, так как с низким  $\text{В/Ц}$  и соответственно с высокой вязкостью эти смеси не обладают необходимой проникающей способностью.

Цементные инъекционные смеси с высоким  $\text{В/Ц}$  характеризуются замедленными сроками схватывания и твердения, неудовлетворительной седиментационной устойчивостью и низкой прочностью [12;14]. Кроме того, при нагнетании таких инъекционных смесей в структуру трещиноватых горных пород с высоким коэффициентом фильтрации происходит ее неконтролируемое распределение через сеть трещин, перемешивание с грунтовой водой, разбавление и вынос фильтрующим напором. Таким образом, эффективность цементного нагнетания резко падает с увеличением коэффициента фильтрации.

С целью сокращения сроков схватывания цементной инъекционной смеси применяют ее смешивание непосредственно в зоне выхода инъекционной смеси в структуру грунта с силикатом натрия, являющимся ускорителем схватывания [1;3;7]. Однако, в этом случае технологически сложно обеспечить проектное соотношение и гомогенизацию цементной смеси и силиката натрия, а также сохранения заданной подвижности инъекционной смеси, поскольку при контакте цементного раствора с силикатом натрия происходит практически мгновенное структурообразование инъекционной смеси, что исключает ее проникновение в структуру грунта [9;11;13].

При ликвидации активных водопотоков, в качестве превентивной меры, используют гидроактивные полиуретановые смолы, которые в течение нескольких секунд после контакта с водой образуют тонкоячеистую с открытой пористостью пену со значительным увеличением объема [8;10]. В связи с тем, что требования по долговечности к этим материалам не предъявляются, прогнозировать срок их службы не представляется

возможным. Кроме того, эти полиуретановые системы, как правило, являются 2-х компонентными, требующими применения специального смешительного и инъекционного оборудования, что существенно осложняет их применение при производстве работ.

**Целью** работы является экспериментальное обоснование технологических параметров создания противofильтрационной завесы путем нагнетания инъекционной смеси на основе портландцемента в трещиноватые грунты для восстановления их водонепроницаемости, а также упрочнения массива горных пород.

**Требования:** Данная композиция должна иметь вязкость, необходимую для пропитки трещиноватых горных пород в течение 80-110 минут после приготовления, для осуществления инъекции, с последующим быстрым структурообразованием и твердением после завершения нагнетания, ликвидируя активные водопроявления.

**Материалы и способы приготовления инъекционных составов:** с целью повышения эффективности пропитки трещиноватых горных пород с высоким коэффициентом фильтрации был выбран состав инъекционной смеси, включающий следующие компоненты: портландцемент, вода и добавки в виде ортофосфата натрия  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  (ФН) и силикат натрия  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Введение ФН необходимо для регулирования сроков структурообразования портландцемента, а силикат натрия для ускорения его схватывания и начала твердения. Был разработан способ приготовления цементных инъекционных составов, который предусматривает последовательное смешивание компонентов в три этапа:

- сначала приготавливается водный раствор фосфата натрия ( $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )
- затем водный раствор ФН перемешивали в течение 3 мин с портландцементом,
- полученный раствор смешивали с силикатом натрия в течение 2 мин.

Для установления влияния добавок фосфата натрия и силиката натрия на вязкость и время схватывания инъекционной смеси был использован двухфакторный трехуровневый математический метод планирования эксперимента. Количество используемого силиката натрия плотностью 1,22 г/см<sup>3</sup> менялось от 10 до 30%, а сухого фосфата натрия от 3 до 9% от массы портландцемента.

Условия двухфакторного планирования эксперимента

ФАКТОРЫ		УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ			ИНТЕРВАЛ
Натуральный вид	Кодовый вид	-1	0	+1	
Силикат натрия %	X1	10,00	20,00	30,00	10,00
Фосфат натрия %	X2	3,00	6,00	9,00	3,00

**Результаты** обработки экспериментальных данных по времени начала структурообразования инъекционных смесей (У(Тнг), мин).

Точки плана, u	Факторы		Натуральное значение (мин) у	Расчетные параметры для определения коэффициентов при:				
				линейных членах		квадратичных членах взаимодействиях		
	x1	x2	yx1	yx2	yx1 <sup>2</sup>	yx2 <sup>2</sup>	yx1x2	
1	+1	+1	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00

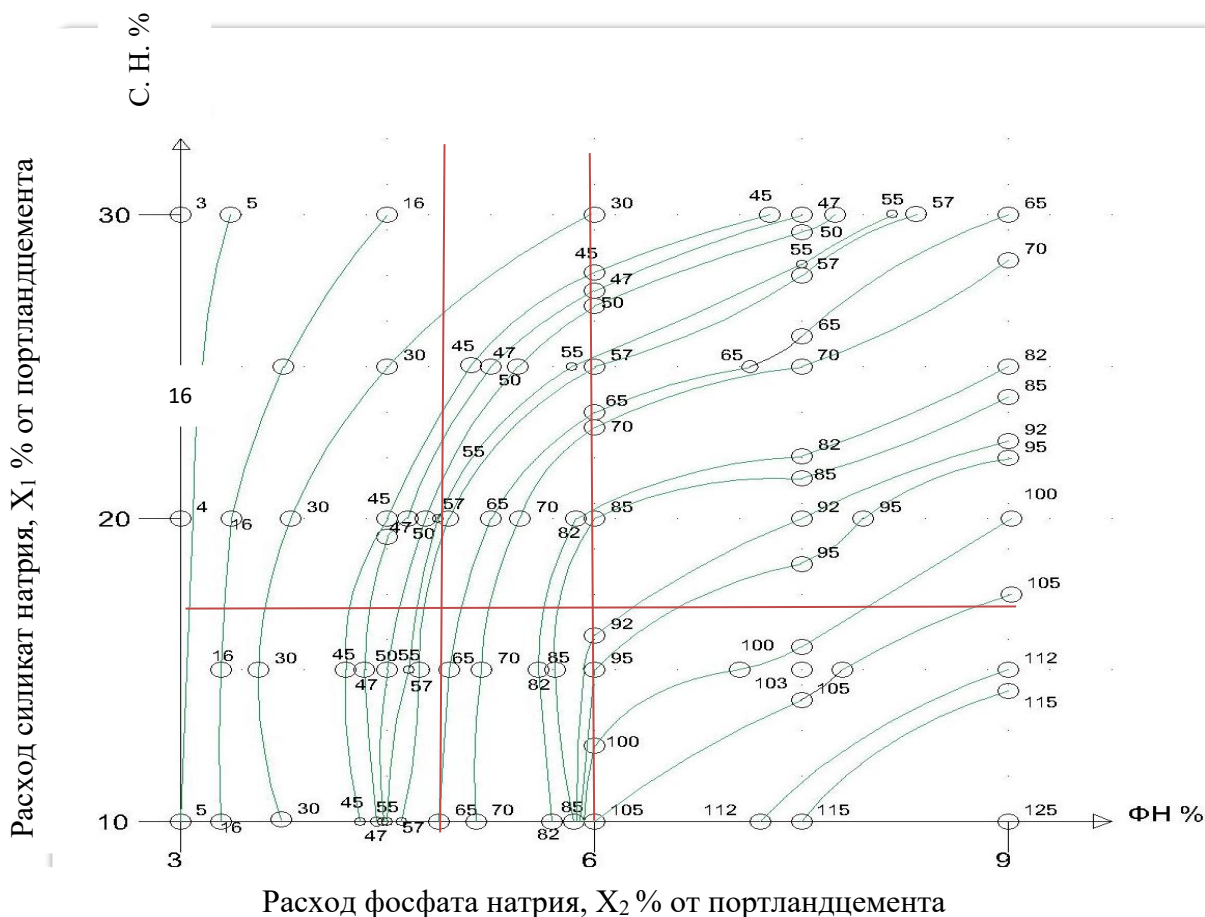


2	+1	-1	5,00	5,00	-5,00	5,00	5,00	-5,00
3	-1	+1	65,00	-65,00	65,00	65,00	65,00	-65,00
4	-1	-1	3,00	-3,00	-3,00	3,00	3,00	3,00
5	+1	0	105,00	105,00	0,00	105,00	0,00	0,00
6	-1	0	30,00	-30,00	0,00	30,00	0,00	0,00
7	0	+1	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
8	0	-1	4,00	0,00	-4,00	0,00	4,00	0,00
9	0	0	80,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0	0	85,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0	0	90,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
С у м м а:			692,00	137,00	278,00	333,00	302,00	58,00

Коэффициенты:	b0	b1	b2	b11	b22	b12
	81,868	22,838	46,343	-9,6323	-25,1323	14,5

Уравнение регрессии:

$$Y(\text{Тнг})=81,8679+22,8379X_1+46,3426X_2-9,6323X_1^2-25,1323 X_2^2+14,5X_1X_2$$



**Рис. 1** Поверхности отклика от метода планирования эксперимента с показателями начало структурообразования (мин)

На основе анализа рис. 1 позволили установить расход фосфата натрия (4-5% от массы смеси) при расходе силикат натрия 10-15% от массы цемента, обеспечивающие требуемое время структурообразование 80-110 мин

Исследование вязкости полученной инъекционной смеси, показало, что она зависит от водоцементного отношения [10]. Было установлено, что для пропитки трещиноватых горных пород вязкость должна быть около 80с, измеренная на вискозиметре Марша (ГОСТ 1.4.160-2.024.14 (ISO 10414-2:2011), достаточная для пропитки трещиноватых горных пород. Для исследуемой цементной инъекционной смеси такая вязкость соответствует  $V/C=0,5$ .

## **ВЫВОДЫ**

В результате исследований было установлено, что цементная инъекционная смесь с массовой долей портландцемента 60%, воды 30%, водного раствора фосфата натрия 4-5% от массы смеси и силиката натрия 10-15% от массы цемента, которая имеет вязкость 80с, время структурообразования 80-110 мин при  $V/C=0,5$  и прочность через 24 ч 1,5-2 МПа может быть использована для пропитки трещиноватых горных пород с последующим быстрым структурообразованием и твердением после завершения нагнетания, ликвидируя активные водопроявления.

В производственных условиях приготовление инъекционной смеси осуществляется в скоростном смесителе, особенностью которого является скорость вращения активатора не менее 2500 об/мин. при мощности двигателя не менее 1 кВт на каждые 20 л приготавливаемой инъекционной смеси. При этом, ёмкость смесителя должна быть оборудована пристенными отбойниками. Минимальная суммарная площадь отбойников ниже середины емкости - 300 см<sup>2</sup>. Инъекционная смесь приготавливается также в три этапа. После введения в смеситель расчётного количества, смесь премешивается на менее 150 сек. Скоростной смеситель может быть изготовлен на базе наиболее распространенного в России растворного смесителя РМ 350, РМ-500, РМ-750 с некоторыми изменениями в их конструкции. Приготовленную инъекционную переливают в емкость, оборудованную низкоскоростным смесителем (100...300об/мин) при постоянной активации, до выработки приготовленного объема смеси.

В качестве инъекционного насоса используются двух плунжерные насосы с регулируемой и контролируемой интенсивностью нагнетания. Регулировка интенсивности подачи насоса должна осуществляться в диапазоне от 0 до 10–15 л/мин. Наиболее эффективно использовать насосы, позволяющие оперативно регулировать как рабочее давление, так и расход суспензии в процессе нагнетания с одновременной регистрацией в памяти процессора режима нагнетания. Шланги, соединения и запорная арматура должны быть рассчитаны на давление не менее 100 бар.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Агафонов Г. И. Лакокрасочные покрытия на основе жидких стекол / Агафонов Г.И.- М Химия -1988-765/
2. Яковлев Г. И. Отделочная композиция на основе жидкого стекла / Яковлев Г. И. / Строительные материалы оборудование технология XXI века-2009-№ 7 с 42-44
3. Шайбадуллина А. В. Многофункциональное декоративно- фасадное покрытие на цементно-силикатном вяжущем/Автореферат диссертации, 2018.
4. Пестрякова Е.А., Харченко И.Я., Пискунов А.А., Харченко А.И., Бетербиев А.С.Э., Сонин А.Н./Эффективные способы ликвидации водопроявлений при эксплуатации подземных сооружений/ Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 3. С. 32.
5. Кривчун С.А., Баженов М.И., Сугкоев З.А./ Композиционное вяжущее для ликвидации водопроявлений в подземных сооружениях/ Современные строительные материалы, технологи и конструкции Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО "ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова". Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова» (ФГБОУ ВПО «ГГНТУ»), г. Грозный. 2015. С. 461-466.
6. Харченко И.Я., Панченко А.И., Алексеев В.А., Харченко А.И./ Ликвидация водопроявлений при строительстве и эксплуатации тоннельных и притоннельных сооружений/Жилищное строительство. 2018. № 9. С. 24-29.
7. Альмов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. - М.: МИФИ, 2005. – 52 с.

8. Маева, И.С. Модификация ангидридовых композиций ультра- и нанодисперсными добавками: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Маева Ирина Сергеевна. - Казань, 2010. - 154 с.
9. Никитина Е.И., Дудик О.Р./ Химическое закрепление грунтов методом инъекции/В сборнике: Политранспортные системы Материалы X Международной научно-технической конференции. 2019. С. 129-130.
10. Комолов В.Б./ Смесь. /Патент на изобретение RU 2643869, 06.02.2018. Заявка № 2016145347 от 21.11.2016.
11. Ляпидевская О.Б., Безуглова Е.А./ Гидроизоляционный состав для защиты бетонных и каменных конструкций "минслаш-12"/ Патент на изобретение RU 2511198 C1, 10.04.2014. Заявка № 2012149798/03 от 22.11.2012.
12. Николаенко А.И./ Способ получения цементно-стружечных блоков/ Патент на изобретение: RU 2578077 C1, 20.03.2016. Заявка № 2014148009/03 от 27.11.2014.
13. Ден Ф. Добавки для бетона. // Петербургский строительный рынок. -2006.-№6-7(91).-С. 43-47.
14. ГОСТ 310.3- «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерность изменения объёма».ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»
15. Харченко И.Я., Кривчун С.А., Харченко А.И.: Технология и свойства композиционных вяжущих для уплотнения и упрочнения грунтов при освоении подземного пространства // I Международная научно-практическая конференция ИНТЕРМЕТРО «Перспективы развития метрополитена в условиях интенсивного внедрения новых технологий», 17–18.12.2015, Москва.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННОГО НА ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

О.А. Васильева<sup>1</sup>, А.Н. Суворова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>Высший химический колледж, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, пл. Миусская, д. 9,

<sup>1</sup>vasilievaoa@mgsu.ru

<sup>2</sup>marshmellow222@mail.ru

## Аннотация

Рассмотрен процесс производства строительных материалов, основанный на трехкомпонентной химической реакции, проводимой в конечном цилиндре. Для математического описания подобных обратимых химических реакций применяются кинетические системы уравнений, такие как уравнение Карлемана, уравнение Годунова-Султангазина, уравнение Бродуэлла и др. Приведена, недавно предложенная математическая модель рассматриваемого процесса. Математическая модель представляет собой начально-краевую задачу для системы трех нелинейных уравнений в частных производных второго порядка, являющихся регуляризацией кинетической системы уравнений Годунова-Султангазина. Начально-краевая задача является нелинейной, поэтому в общем случае ее решение в аналитическом виде получить пока не удастся. Для ее исследования применяются численные методы, в частности конечно-разностный метод второго порядка точности и квадратурные формулы. На основе указанной модели проведено численное моделирование процесса, приведены и обсуждаются примеры полученных результатов.

## ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрен процесс производства строительных материалов, основанный на химической реакции трех реагентов, проводимой в цилиндре, имеющем высоту  $l$ . Для описания подобных процессов применяются дискретные кинетические модели [1-7]. В данной работе для математического описания применяется предложенная недавно [8, 9] математическая модель, являющаяся регуляризацией указанных моделей. Она позволяет корректно учесть конечные размеры цилиндра.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сформулированная для приведенных переменных математическая модель имеет вид:

$$u_t + cu_x = \varepsilon^{-1}(v^2 - uw) + \alpha(u_{xx} - 2v_{xx} + w_{xx}), t > 0, 0 < x < 1$$

$$v_t = -2\varepsilon^{-1}(v^2 - uw) - 2\alpha(u_{xx} - 2v_{xx} + w_{xx})$$

$$w_t - cw_x = \varepsilon^{-1}(v^2 - uw) + \alpha(u_{xx} - 2v_{xx} + w_{xx})$$

$$u(0, x) = u_0(x),$$

$$v(0, x) = v_0(x),$$

$$w(0, x) = w_0(x)$$

$$u(t, 0) = u(t, 1) = u^0,$$

$$v(t, 0) = v(t, 1) = v^0,$$

$$w(t, 0) = w(t, 1) = w^0.$$

Здесь  $u(t, x)$ ,  $v(t, x)$ ,  $w(t, x)$  – плотности реагентов в момент времени  $t$  в точке  $x$ , высота цилиндра  $l=1$ . Предполагается, что  $(v^0)^2 = u^0 w^0$ , и

$$\int_0^1 u_0(x) dx = u^0,$$

$$\int_0^1 v_0(x) dx = v^0,$$

$$\int_0^1 w_0(x) dx = w^0.$$

Начально-краевая задача с невозмущенными начальными условиями

$$u(0, x) = u^0,$$

$$v(0, x) = v^0,$$

$$w(0, x) = w^0$$

имеет стационарное решение

$$u(t, x) = u^s(x) = u^0, v(t, x) = v^s(x) = v^0, w(t, x) = w^s(x) = w^0,$$

при достижении которого происходит окончание реакции. Для оценки «энергии» отклонения решения от стационарного решения введем следующие функции

$$E_u(t) = \left( \int_0^1 (u(t, x) - u^s(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$E_v(t) = \left( \int_0^1 (v(t, x) - v^s(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$E_w(t) = \left( \int_0^1 (w(t, x) - w^s(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$E(t) = (E_u^2(t) + E_v^2(t) + E_w^2(t))^{0.5}.$$

Для исследования рассматриваемой математической модели применяются численные методы, в частности конечно-разностный метод второго порядка точности и квадратурные формулы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведено численное исследование представленной математической модели для следующих начально-краевых условий

$$u(0, x) = u_0(x) = 1,$$

$$v(0, x) = v_0(x) = 1,$$

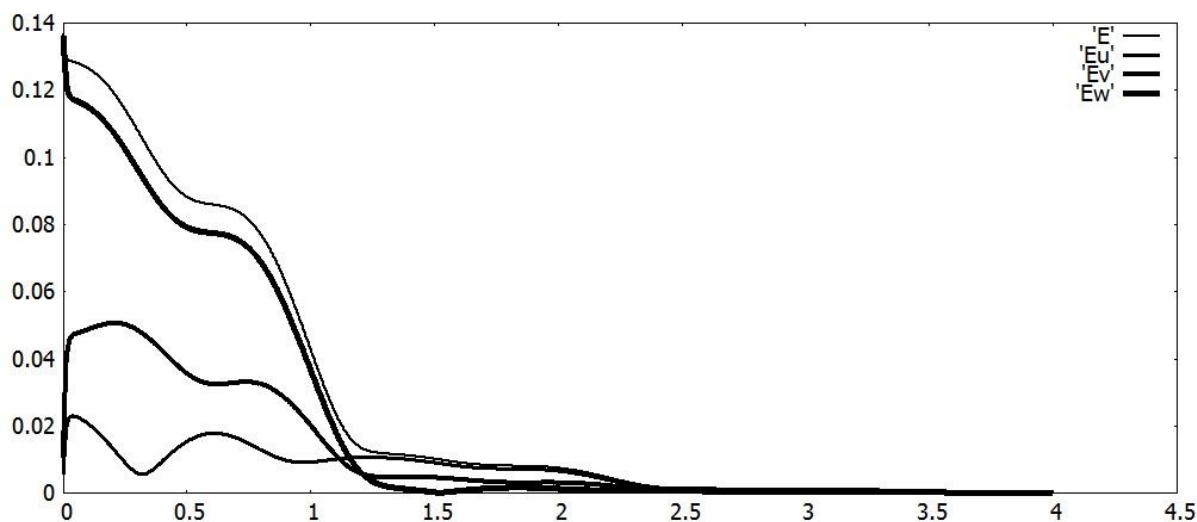
$$w(0, x) = w_0(x) = 1 + 0.2 \sin 6.28318x,$$

$$u(t, 0) = u(t, 1) = u^0 = 1,$$

$$v(t, 0) = v(t, 1) = v^0 = 1,$$

$$w(t, 0) = w(t, 1) = w^0 = 1.$$

В начальный момент времени одна из компонент имеет возмущение.



**Рис. 1.** Зависимости отклонений от стационарного решения задачи

На рис.1 представлены зависимости отклонений компонент решения задачи от компонент стационарного решения и общего отклонения.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрен процесс производства строительных материалов, основанный на трехкомпонентной химической реакции, проводимой в конечном цилиндре. Приведена, недавно предложенная математическая модель рассматриваемого процесса. Математическая модель представляет собой начально-краевую задачу для системы трех нелинейных уравнений в частных производных второго порядка, являющихся регуляризацией кинетической системы уравнений Годунова-Султангазина. Приведены примеры полученных численных результатов, которые хорошо согласуются с известными теоретическими результатами и результатами численных экспериментов. Рассмотрение двумерного случая является предметом следующей публикации.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность профессору Е.В.Радкевичу за полезные обсуждения работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Годунов С.К., Султангазин У.М. О дискретных моделях кинетического уравнения Больцмана // Успехи МН. 1974. Т. XXVI. №. 3(159). С. 3-51.
2. Радкевич Е.В. О дискретных кинетических уравнениях // Доклады Академии наук. 2012. Т. 447. № С. 369-372.
3. Ильин О.В. Изучение существования решений и устойчивости кинетической системы Карлемана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47. №12. С. 2076 - 2087.
4. Aristov V., Ilyin O. Kinetic model of the spatio-temporal turbulence // Phys. Let. A, 2010. М. 374. Pp. 4381 - 4384.
5. Radkevich E.V., Vasil'eva O. A. Generation of Chaotic Dynamics and Local Equilibrium for the Carleman Equation.// Journal of Mathematical Science. 2017. V. 227, №5 P. 764-7956.
6. Васильева О.А., Дузновский С.А., Радкевич Е.В. О природе локального равновесия уравнений Карлемана и Годунова-Султангазина// Современная математика. Фундаментальные направления. 2016, т. 60. С. 23-81
7. Васильева О.А. Численное исследование системы уравнений Годунова-Султангазина. Периодический случай // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 27-35.
8. Vasil'eva O. A. Mathematical Modeling of the Building Materials Production Process. //Journal of Physics. Conference. Series. Collection of Materials of the International Conference MMA-2019. Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). 2020, 012157
9. Vasil'eva O. A. Verification of the building materials production process mathematical model.// IOP Conf. Ser. Material Science and Engineering.7 Ser. "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education", IPICSE 2020", 2021, 0120009.

# ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЕВОЙ ПУДРЫ НА СВОЙСТВА ЛЕГКОГО ГАЗОБЕТОНА

Танг Ван Лам<sup>1</sup>, Нгуен Чынг Хьеу<sup>2</sup>, Б.И. Булгаков<sup>3</sup>, О.В. Александрова<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Ханойский горно-геологический университет, г. Ханой, Вьетнам,

<sup>3,4</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>lamvantang@gmail.com

<sup>2</sup>hieuhumgk64@gmail.com

<sup>3</sup>BulgakovBI@mgsu.ru

<sup>4</sup>AleksandrovaOV@mgsu.ru

## Аннотация

Легкие газобетоны получают путем добавления газообразователя, как правило в виде алюминиевой пудры или пасты, во влажную сырьевую композицию, в результате чего в ходе отверждения бетонной массы будет происходить поризация структуры из-за химического взаимодействия алюминия со свободным гидроксидом кальция с выделением водорода. При этом, количество вводимого газообразователя зависит от требований, предъявляемым к свойствам получаемого газобетона.

Целью настоящей работы было исследование свойств газобетона, содержащего топливную низкокальциевую золу-уноса и доменный шлак. Полученные результаты показали, что с увеличением содержания алюминиевой пудры в бетонной смеси плотность газобетона уменьшается пропорционально росту его пористости, что приводит к снижению прочностных показателей бетона на сжатие и на растяжение при изгибе. Включение многотоннажных промышленных отходов в виде кислой золы-уноса, характеризующейся большой пуццоланической активностью из-за высокого содержания аморфного кремнезема, приводящей к образованию вторичных низкоосновных гидросиликатов кальция – основных минералов прочности цементного камня бетона, и доменного шлака, обладающего благодаря своему химическому составу не только пуццоланическими, но и гидравлическими свойствами, в состав сырьевой композиции позволяет сократить расход портландцемента и будет оказывать благоприятное влияние на экологическую ситуацию во Вьетнаме.

## ВВЕДЕНИЕ

Топливная зола-уноса и доменные шлаки – одни из самых крупнотоннажных промышленных отходов в современном мире. Зола-уноса содержится в отходящих дымовых газах в виде мелких частиц, которые образуются при сжигании твердого топлива на теплоэлектростанциях [1, 2]. В составе золы-уноса содержится много тонкодисперсных фаз, состоящих в основном из оксидов кремния, алюминия, железа и серы, кроме того, она может содержать некоторое количество несгоревшего угля [3, 4]. Доменные шлаки - отходы черной металлургии в виде частиц диаметром 10 ÷ 200 мм, которые получают в качестве побочного продукта при выплавке чугуна из железной руды [5, 6].

Одновременно с быстрым развитием индустриализации и модернизации промышленности во Вьетнаме растет спрос на электроэнергию, а также на чугун, сталь и различные сплавы. Все это приводит к увеличению количества образующихся топливных зол и шлаков, требующих все большую площадь свалок для захоронения твердых отходов [7]. При неправильной организации захоронения такие отходы будут загрязнять воду и почву, нанося, тем самым, ущерб окружающей среде [8]. Учитывая ограниченные площади территории Вьетнама, такая ситуация недопустима.

Поэтому в настоящее время Вьетнам ориентирован на создание экономики замкнутого цикла, направленной на экономию природных ресурсов и рациональную утилизацию крупнотоннажных техногенных отходов. В связи с этим, мероприятия по использованию большого количества золы и шлака – отходов работы тепловых



электростанций и металлургических предприятий, в качестве сырья для производства строительных материалов представляются очень важной экологической задачей, решение которой способно также обеспечить получение существенного экономического эффекта.

Как известно, различные виды газобетона получают путем образования пузырьковых пустот в структуре сырьевых смесей, состоящих из вяжущего вещества и мелкого заполнителя, которые равномерно распределены по всему объему твердеющей бетонной массы. При этом, газообразующая добавка в виде алюминиевой пудры или пасты позволяет получить легкий бетон повышенной пористости, актуальный для применения в современном строительстве. Причем, такой бетон используется не только для изготовления тепло- и звукоизоляционных материалов [2, 9], но и в огнезащитных конструкциях, а также с целью уменьшения габаритных размеров и массы строительных изделий и конструкций и снижения оказываемых ими статических и сейсмических нагрузок [3, 4]. Таким образом, фундаменты возводимых зданий и сооружений становятся более экономичными, а затраты на строительство снижаются [10]. Типичные легкие бетоны имеют диапазон средней плотности в сухом состоянии от 300 до 2000 кг/м<sup>3</sup>, а их кубическая прочность на сжатие в проектном возрасте 28 суток находится в интервале от нескольких целых до 60 МПа [11].

Потому основной задачей настоящего исследования было изучение влияния количества алюминиевой пудры на физико-механические свойства легкого газобетона, содержащего низкокальциевую золу-уноса и доменный шлак, и предназначенного для изготовления сборных легких панелей для строительства высотных зданий во Вьетнаме.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Материалы

Для получения легких газобетонов были использованы следующих сырьевые материалы.

Портландцемент (Ц) ЦЕМ II 42,5 Н производства завода «Там Дьеп» (Вьетнам) с истинной плотностью 3,15 г/м<sup>3</sup> и удельной поверхностью 3650 см<sup>2</sup>/г. Характеристики использованного портландцемента приведены в таблице 1 и 2.

Таблица 1. Химический состав клинкера портландцемента завода «Там Дьеп»

Содержание оксидов, %						
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	п.п.п.*
62,23	22,27	5,37	4,12	2,40	2,63	0,98

Примечание: п.п.п.\* - потери при прокаливании.

Таблица 2. Минералогический состав клинкера портландцемента завода «Там Дьеп»

Содержание минералов, %				
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	Прочие
56,3	23,4	4,7	12,4	3,2

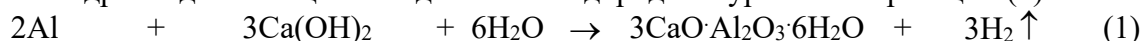
Низкокальциевая (кислая) топливная зола-уноса (ЗУ) и доменный шлак (ДШ). Их химический состав и физические свойства представлены в таблице 3.

Таблица 3. Химический состав и физические свойства золы-уноса и доменного шлака

Материалы	Зола-уноса	Доменный шлак
Химический состав, %		
SiO <sub>2</sub>	54,2	36,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,3	12,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,8	3,4
SO <sub>3</sub>	2,5	5,7
K <sub>2</sub> O	1,5	0,4
Na <sub>2</sub> O	1,6	0,3
CaO	1,2	40,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,4	-
Потери при прокаливании	4,5	1,2
Физические свойства		
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	5,82	0,37
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,35	2,92
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1575	1550
Водопотребность, % масс.	101	145

При этом, доменный шлак был использован в качестве мелкого заполнителя в составе сырьевых композиций для получения легких газобетонов.

Для получения ячеистой структуры газобетона была использована алюминиевая пудра (АП) с размером частиц 50-75 мкм, истинной плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup> и насыпной плотностью 1560 кг/м<sup>3</sup>, которая в бетонной смеси вступала в химическую реакцию со свободным гидроксидом кальция с выделением водорода по уравнению реакции (1):



Для снижения водопотребности бетонной смеси при сохранении ее требуемой удобоукладываемости были использованы поликарбоксилатный суперпластификатор SR 5000F (SR5000) производства фирмы «Silk Road» с плотностью водного раствора 1,12 г/см<sup>3</sup> при температуре 20 ± 5°С. Это суперпластификатор типа G, соответствующий требованиям ASTM C494.

Вода (В), использованная для приготовления газобетонной смеси, соответствовала требованиям ГОСТ 23732-2011 и TCVN 4506: 2012.

### Методы

Составы газобетонных смесей рассчитывали методом абсолютных объемов с последующей корректировкой по результатам экспериментальных испытаний.

Среднюю плотность полученных газобетонов определяли по стандарту TCVN 3115: 1993, а их пористость - по ГОСТ 12730.4-2020.

Прочность на сжатие ( $f_{cs}$ , МПа) газобетонов определяли испытанием по ГОСТ 10180-2012 образцов-кубов размером 150x150x150 мм в возрасте 28 суток нормального твердения, а на растяжение при изгибе – на образцах-призмах размером 100x100x400 мм.

### Приготовление легких газобетонных смесей

Соотношения между сырьевыми компонентами, использованные для получения исследованных газобетонов, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Соотношения между сырьевыми компонентами

Соотношение	$\frac{ДШ}{Ц}$	$\frac{ЗУ}{Ц}$	$\frac{SR5000}{Ц}$	$\frac{АП}{Ц}$	$\frac{В}{Ц}$	Относительный объем вовлеченного воздуха
Значение	2,0	0,3	0,015	0,0025 ÷ 0,01	0,5	2%

Для проведения исследований были использованы четыре состава газобетонных смесей с различным содержанием алюминиевой пудры, соответственно 0,25, 0,5, 0,75 и 1,0% от массы портландцемента.

Составы газобетонных смесей представлены в таблице 5.

Таблица 5. Составы газобетонных смесей

№ состава	АП, %	Содержание сырьевых компонентов, кг/м <sup>3</sup>					
		Ц	ДШ	ЗУ	В	SP5000	АП
Состав №1	0,25	400	800	120	200	6	1
Состав №2	0,50	400	800	120	200	6	2
Состав №3	0,75	400	800	120	200	6	3
Состав №4	1,0	400	800	120	200	6	4

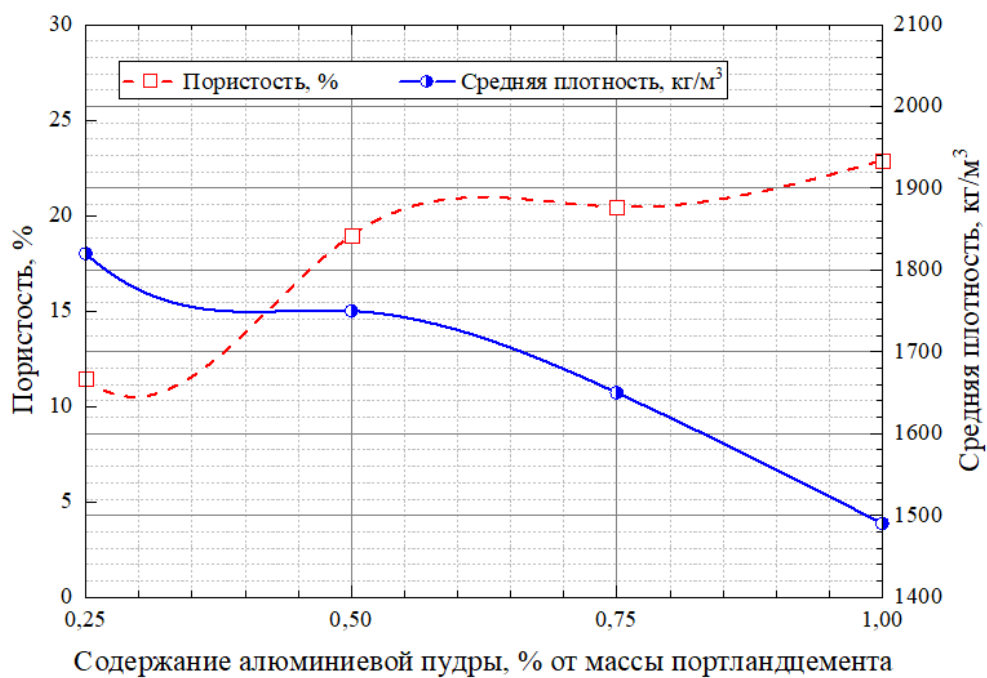
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты исследования свойств газобетонов разработанных составов приведены в таблице 6.

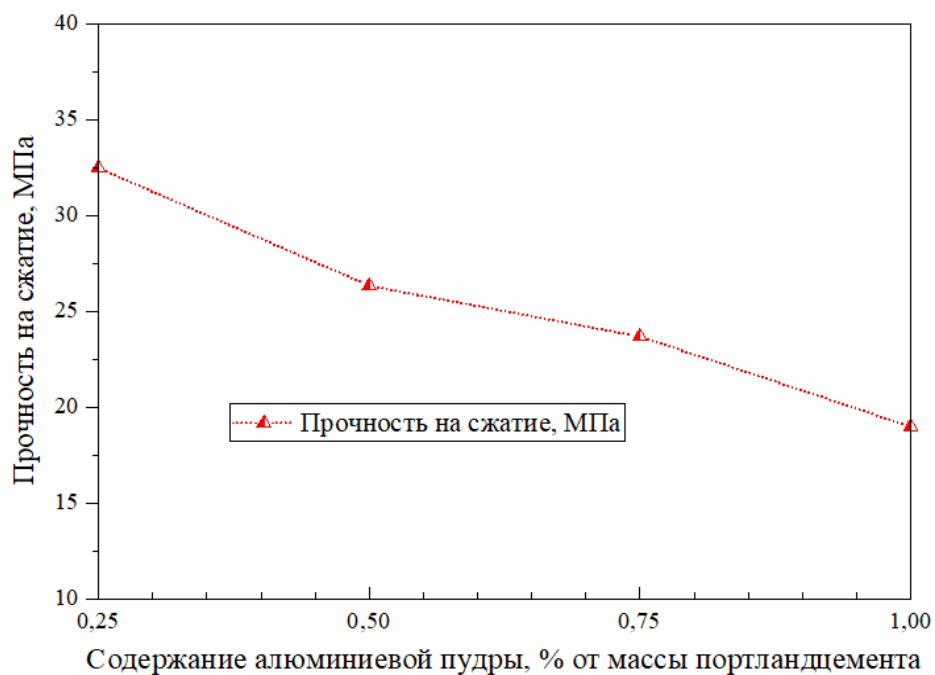
Таблица 6. Свойства исследованных газобетонов

№ состава	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Прочность на сжатие, МПа				Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток, МПа
			3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.	
Состав №1	1820	11,45	16,2	23,6	29,5	31,8	4,05
Состав №2	1750	18,95	13,1	17,8	23,0	25,7	3,32
Состав №3	1650	20,45	12,8	16,0	20,3	22,3	3,05
Состав №4	1490	22,88	11,5	14,1	17,6	20,0	2,95

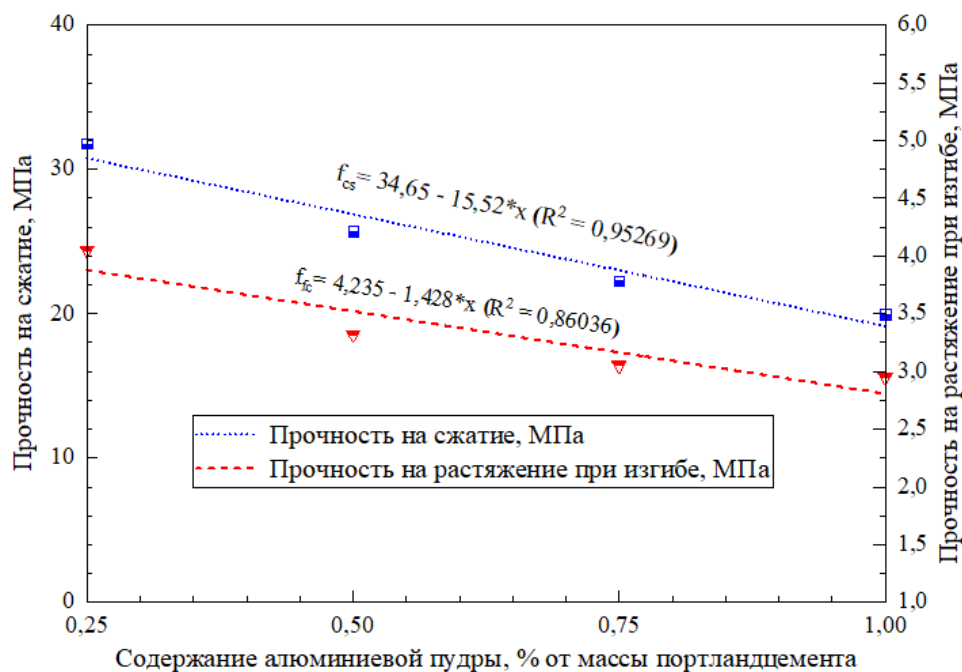
Из приведенных в таблице 1 экспериментальных результатов видно, что увеличение концентрации алюминиевой пудры в бетонной смеси с 0,25 до 1% от массы портландцемента приводит к закономерному снижению средней плотности газобетонов с 1820 до 1490 кг/м<sup>3</sup> и повышению их пористости с 11,45 до 22,88% (рис. 1), что в свою очередь вызывает понижение их прочностных показателей на сжатие и на растяжение при изгибе, - соответственно, с 31,8 до 20 МПа и с 4,04 до 2,95 МПа в возрасте твердения 28 суток (рис. 2 и 3).



**Рис. 1.** Влияние содержания алюминиевой пудры на среднюю плотность и пористость газобетонов



**Рис. 2.** Влияние содержания алюминиевой пудры на прочность газобетонов на сжатие в возрасте 28 суток



**Рис. 3.** Зависимость прочностных показателей газобетонов на сжатие и на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток от содержания алюминиевой пудры

Для корреляции полученных экспериментальных данных был использован метод линейной регрессии, в результате чего были получены уравнения (2) и (3) со значениями коэффициента корреляции ( $R^2$ ) соответственно 0,95269 и 0,86036 для прочности газобетонных образцов на сжатие и на растяжение при изгибе в зависимости от содержания алюминиевой пудры:

- для прочности на сжатие в возрасте 28 суток: (2)  
 $f_{cs} = 34,65 - 15,52 \cdot x \quad (R^2 = 0,95269);$

- для прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток: (3)  
 $f_k = 4,235 - 1,428 \cdot x \quad (R^2 = 0,86036),$

где  $x$  соответствует содержанию алюминиевой пудры в бетонной смеси, в % от массы портландцемента.

## ВЫВОДЫ

На основании анализа результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. С ростом содержания алюминиевой пудры в бетонной смеси происходит понижение средней плотности получаемых газобетонов и увеличение их пористости, сопровождаемое снижением прочностных показателей на сжатие и растяжение при изгибе.

2. В соответствии с требованиями ГОСТ 25820-2021 по средней плотности и прочности на сжатие полученные газобетоны относятся к легким конструкционным и могут быть использованы для изготовления сборных легких панелей, предназначенных для строительства высотных зданий.

3. Использование крупнотоннажных техногенных отходов в виде золы-уноса и доменного шлака для получения легкого конструкционного газобетона будет способствовать снижению его стоимости из-за сокращения расхода портландцемента и окажет положительное влияние на улучшение экологии во Вьетнаме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Government Office, Conclusions of the Prime Minister to implement the production program of utilization of unburned materials and the use of fly ash, slag and gypsum - waste of thermal power plants and chemical plants (ТВ-VPCP 218. Vietnam). 2013.

2. *Tang Van Lam, Vu Kim Dien, Ngo Xuan Hùng, Vu Dinh Tho., Bulgakov, B., Bazhenova, S.* Effect of aluminium powder on light-weight aerated concrete properties // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 02005. EDP Sciences.
3. *Nguyễn T.B., Nguyễn T.T., Đinh H.Q.* Nghiên cứu sử dụng kết hợp tro bay nhiệt điện và xỉ lò cao để chế tạo bê tông chất kết dính kiềm hoạt hóa (không sử dụng xi măng) dùng cho các công trình thủy lợi làm việc trong môi trường biển góp phần bảo vệ môi trường. (Исследования по использованию комбинации термоэлектрической летучей золы и доменного шлака для производства активированного щелочного вяжущего для бетонов (без использования цемента) , работающих в морской среде. Đề tài NCKH cấp Quốc gia mã số KC.08.21/16-20.
4. *Lam V.T., Boris B., Sofia B., Olga A., Anh N.P., Tho D.V.* Effect of rice husk ash and fly ash on the workability of concrete mixture in the high-rise construction // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 33. 02029. 13 p.
5. *M.A.H. Bengin,* Combined Effects of Densified Polystyrene and Unprocessed Fly Ash on Concrete Engineering Properties // Buildings. 2017. Vol. 7 (77).
6. *Congqi Fang, Bing Chen.* Mechanical properties of EPS lightweight concrete // Construction Materials. 2011. Vol. 164. Issue CM4. P. 173-180. DOI: 10.1680/coma.900059.
7. *Nguyễn T.B., Nguyễn T.T., Đinh H.Q.* Nghiên cứu đánh giá chất lượng tro bay, xỉ lò cao của các nhà máy nhiệt điện, luyện kim ở Việt Nam (Исследования по оценке качества летучей золы, доменных шлаков тепловых электростанций и металлургических предприятий Вьетнама) // Tạp chí KH&CN Thủy lợi. 2019. № 57. С. 27-38.
8. *Tang V.L., Boris B., Olga A., Anh N.P., Yuri M.* Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. 032007. 8 p.
9. *Rufino, B., F. Boulc'h, M-V. Coulet, G. Lacroix, and R. Denoyel.* Influence of particles size on thermal properties of aluminium powder // Acta Materialia. 2007. Vol. 55. No. 8. P. 2815-2827.
10. *Shabbar, Rana, Paul Nedwell, and Zhangjian Wu.* Mechanical properties of lightweight aerated concrete with different aluminium powder content // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 120. 02010.
11. *Kumar, E. M., and Ramamurthy, K.* Effect of fineness and dosage of aluminium powder on the properties of moist-cured aerated concrete // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 95. P. 486-496.

# ВЛИЯНИЕ БАРИЙСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

**Н.В. Новиков**

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,  
Novikov177@yandex.ru*

## **Аннотация**

Введение. В современной технологии бетонов для обеспечения защиты от ионизирующих излучений, как правило, используются тяжелые бетоны, содержащие в своём составе дисперсные фазы из природных и искусственных материалов, содержащих химические элементы с высокими атомными номерами. Такие материалы обладают очевидными недостатками, выражающимися в сложности технологий монтажа строительных конструкций и высоких экономических издержках. В данной работе предлагается альтернатива в виде применения для защиты от ионизирующих излучений низких мощностей ячеистых бетонов на основе минерального сырья барита.

Материалы и методы. Объектом исследования в данной работе является композиционный ячеистый материал, полученный методом сухой минерализации, на основе портландцемента, тонкомолотого баритового концентрата, кварцевого песка и раствора пенообразователя. Исследовались прочность материала на изгиб и сжатие, его плотность и технологические свойства цементного раствора. В качестве образцов изготавливались призматические балочки с размерами граней 4см, 4см, 16см. Было изготовлено 15 партий образцов с различным количественным содержанием барийсодержащей добавки, раствора пенообразователя и кварцевого песка. Составы исследуемых образцов подобраны в соответствии с трёхфакторным центральным композиционным планом, для формирования по полученным результатам аналитических моделей эксперимента.

Результаты. Получены экспериментальные данные, показывающие, что увеличение количества кварцевого песка и барийсодержащей добавки способствует увеличению прочности материала на сжатие и на изгиб, а увеличение количества раствора пенообразователя, приводит к снижению данных показателей. Исследование подвижности смеси показало, что введение барийсодержащей добавки снижает подвижность смеси больше, чем введение кварцевого песка.

Выводы. Определены наиболее перспективные составы пенобетона для сооружения конструкций радиационной защиты.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Развитие и распространение технологий, предполагающих использование физически активных воздействий, создаёт потребность в разработке и изучении новых строительных материалов и конструкций, способных обеспечить безопасное применение этих технологий.

Известно, что с увеличением заряда ядра атома возрастает эффективность защиты от  $\gamma$ -излучения. По этой причине, на сегодняшний день для защиты от ионизирующих излучений в строительных конструкциях наиболее распространены решения, использующие свинцовые листы, тяжелые бетоны на различных заполнителях, включающих элементы с большими атомными номерами [1-6], а также существуют решения предлагающее использовать аналог гипсокартонных плит с добавлением барита [7], пеностекло [8] и сухие строительные смеси и штукатурки [9, 10].

В современной технологии бетонов для защиты от ионизирующих излучений применяются композиции, содержащие в своём составе барит ( $BaSO_4$ , плотность  $\rho=4200...4500$  кг/м<sup>3</sup>), магнетит ( $FeO \cdot Fe_2O_3$ ,  $\rho=4650...4800$  кг/м<sup>3</sup>), гематит ( $Fe_2O_3$ ,  $\rho=5260$

кг/м<sup>3</sup>), лимонит ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\rho=4140\text{...}4280$  кг/м<sup>3</sup>), ильменит ( $\text{FeTiO}_3$ ,  $\rho=4600\text{...}4800$  кг/м<sup>3</sup>), частицы чугуна, извлеченные изшлака (диаметром 5–14 мм,  $\rho=7200$  кг/м<sup>3</sup>), чугунную (диаметром 0,3–8 мм,  $\rho=7600$  кг/м<sup>3</sup>) или свинцовую дробь (диаметром 0,1–8 мм,  $\rho=11300$  кг/м<sup>3</sup>), электротермические фосфорные шлаки (отходы, возникающие при получении фосфора,  $\rho=5800\text{...}6200$  кг/м<sup>3</sup>), ферросилиций (частицы диаметром 0,12 мм,  $\rho=6300$  кг/м<sup>3</sup>), специальные железистые гранулы ( $\rho=6800\text{...}7500$  кг/м<sup>3</sup>), железистый песок ( $\rho=7500$  кг/м<sup>3</sup>) и другие [11].

Перспективным методом ослабления физически активных излучений является использование материалов ячеистой структуры. Такой подход позволяет обеспечить улучшение технико-экономических показателей за счёт облегчения защитных конструкций и снижения нагрузки на несущие элементы.

Представленные в данной публикации результаты являются продолжением работ [12-15]. Целью проделанной работы являлся подбор состава барийсодержащего пенобетона таким образом, чтобы обеспечить, за счёт наличия в составе композиции минерального сырья барита, радиационно-защитных свойств материала при сохранении эксплуатационных свойств пенобетона. Эффективность применения баритового наполнителя для усиления радиационно-защитных свойств бетонов подтверждена множеством исследователей со всего мира [16-19].

Поскольку в составе барита присутствует тяжелый элемент барий, требуется тщательная оптимизация при подборе компонентов для получения блоков, соответствующих принятой классификации ячеистых бетонов по плотности (ГОСТ 25485-2019).

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В качестве исходного сырья использовались белковый пенообразователь Rospena (ГОСТ Р 50588-2012), баритовый концентрат КБ-3 производства ООО «Богградский ГОК» с долей сернокислого бария ( $\text{BaSO}_4$ ) 90% (ГОСТ 4682-84, ГОСТ 30240-95), кварцевый песок фр. 0,63-1,25мм (ГОСТ 22551-2019), портландцемент ЦЕМ I 42,5 Евроцемент М500 Д0 (ГОСТ 30515-2013)

В качестве образцов, методом сухой минерализации, изготавливались призматические балочки с размерами граней 4см, 4см, 16см. Было изготовлено 15 партий образцов с различным количественным содержанием барийсодержащей добавки, раствора пенообразователя и кварцевого песка. Исследовались плотность, прочность затвердевшего поризованного цементного раствора на сжатие и растяжение, а также подвижность смеси. Прочность материала на изгиб и сжатие исследовались при помощи гидравлического пресса в соответствии с ГОСТ 30744-2001. Консистенция цементного раствора исследовалась на встряхивающем столике в соответствии с ГОСТ 310.4-81

Консистенция поризованного цементного раствора исследовалась сразу после замешивания. Прочность и плотность пенобетонных блоков исследовалась на 2, 7, 14 и 28 сутки после изготовления образцов, для наблюдения за динамикой набора прочности.

Составы исследуемых образцов подобраны в соответствии с трёхфакторным центральным композиционным планом [20] и представлены в (таблица 1).



Таблица 1. Составы исследуемых образцов.

№ Опыта	Процентное отношение к массе вяжущего		
	Песок	Раствор пенообразователя	КБ-3
1 (Пес. 1; ПО 1; ТБД 1)	77%	53%	30%
2 (Пес. -1; ПО 1; ТБД 1)	39%	53%	30%
3 (Пес. 1; ПО -1; ТБД 1)	77%	43%	30%
4 (Пес. 1; ПО 1; ТБД -1)	77%	53%	18%
5 (Пес. -1; ПО -1; ТБД -1)	39%	43%	18%
6 (Пес. 1; ПО -1; ТБД -1)	77%	43%	18%
7 (Пес. -1; ПО 1; ТБД -1)	39%	53%	18%
8 (Пес. -1; ПО -1; ТБД 1)	39%	43%	30%
9 (Пес. 1,215; ПО 0; ТБД 0)	81%	48%	24%
10 (Пес. -1,215; ПО 0; ТБД 0)	35%	48%	24%
11 (Пес. 0; ПО 1,215; ТБД 0)	58%	54%	24%
12 (Пес. 0; ПО -1,215; ТБД 0)	58%	42%	24%
13 (Пес. 0; ПО 0; ТБД 1,215)	58%	48%	33%
14 (Пес. 0; ПО 0; ТБД -1,215)	58%	48%	15%
15 (Пес. 0; ПО 0; ТБД 0)	58%	48%	24%

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На гистограммах представлены результаты исследования прочности образцов на сжатие (рис.1), прочности образцов на изгиб (рис.2) и плотности (рис.3).

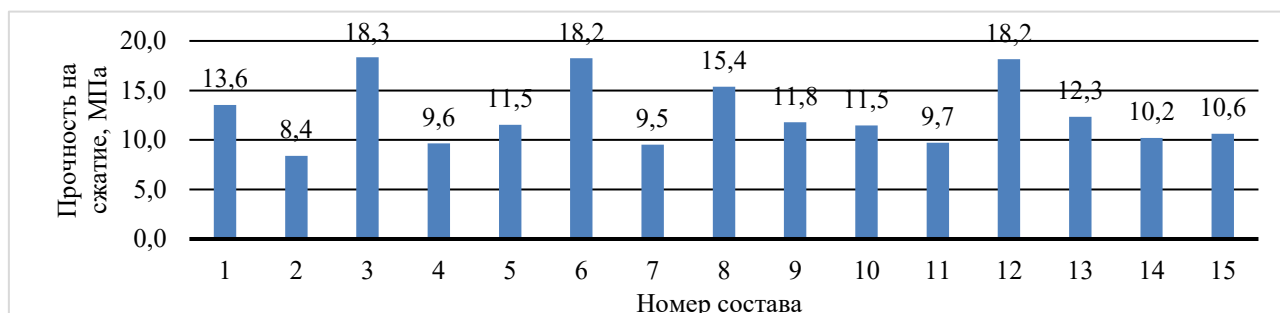


Рис. 1. Прочность исследуемых образцов на сжатие на 28 суток.

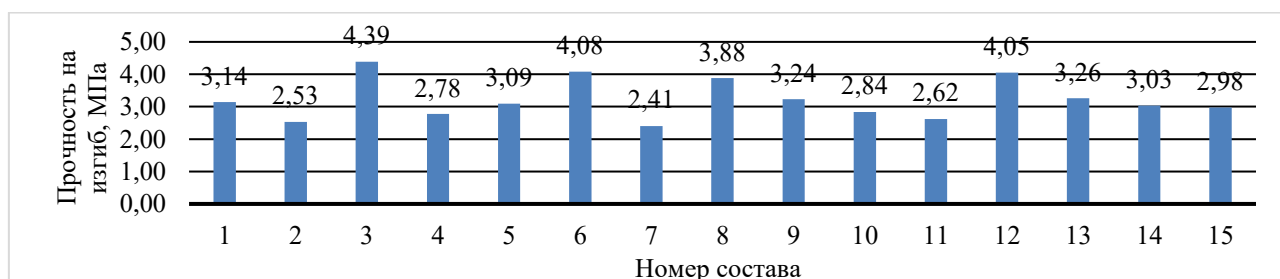
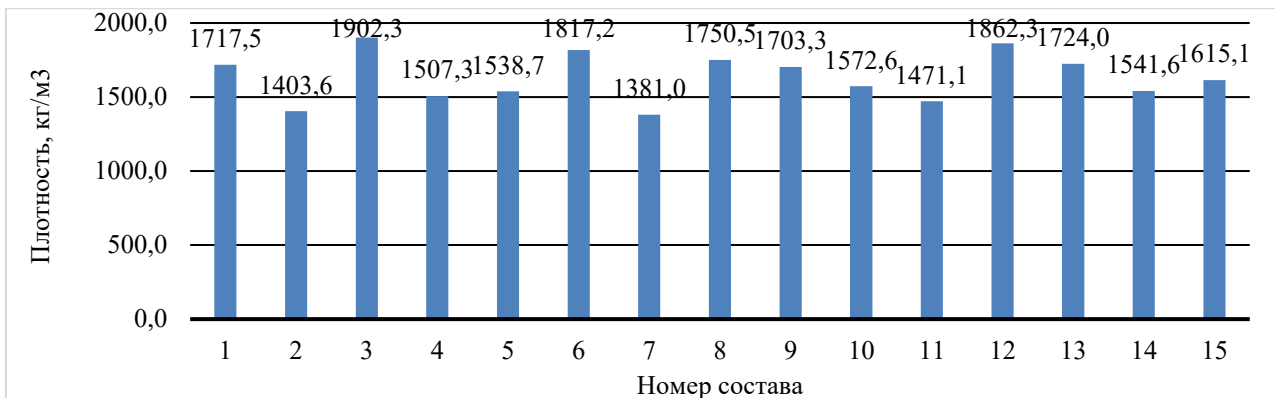
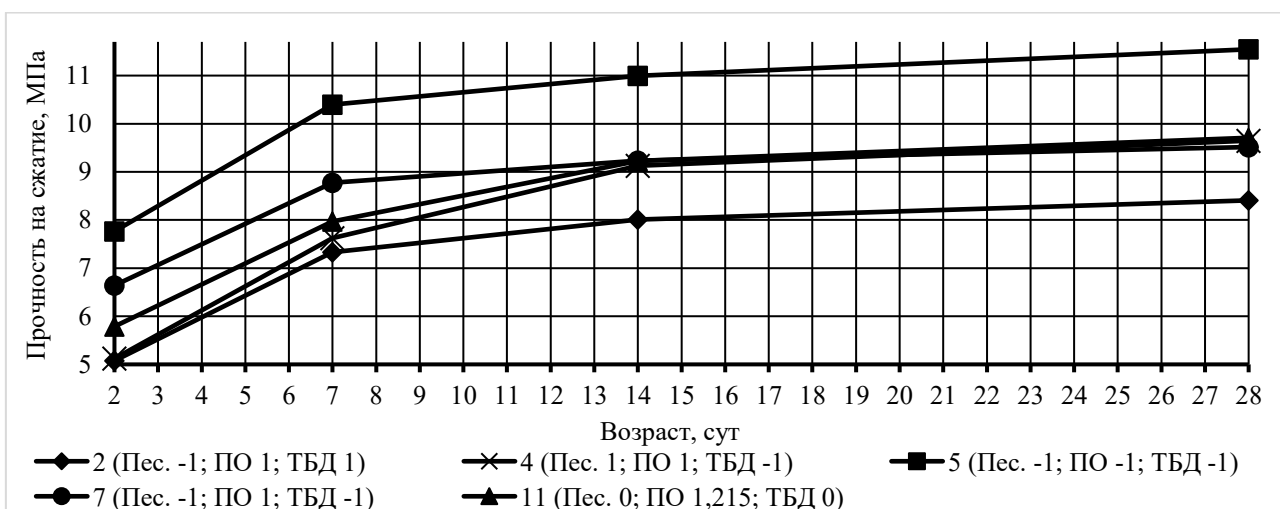


Рис. 2. Прочность исследуемых образцов на изгиб на 28 суток.

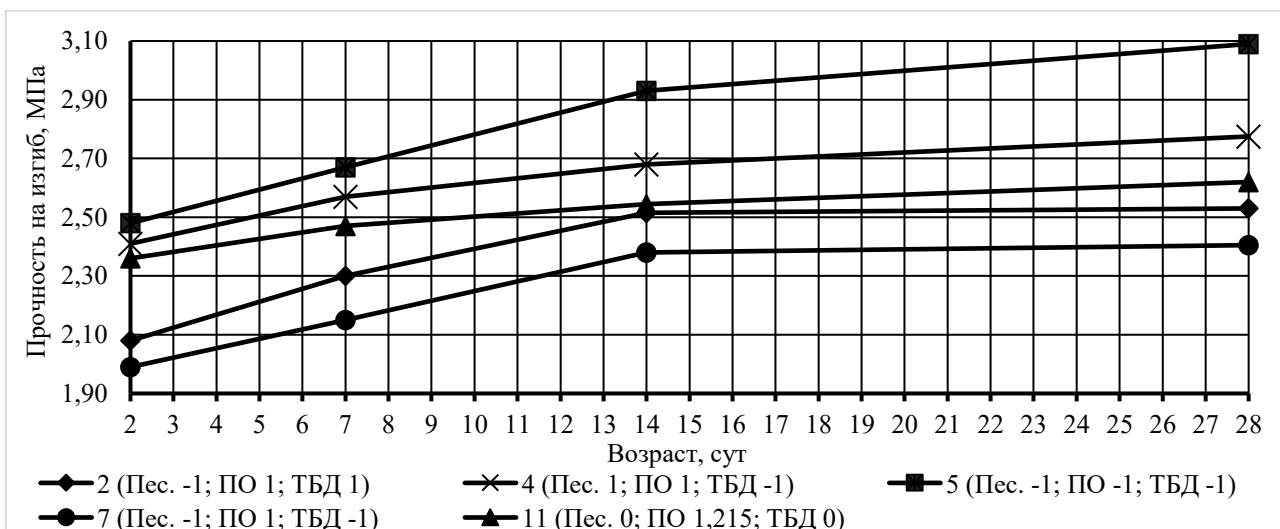


**Рис. 3.** Плотность исследуемых образцов на 28 сутки.

На графиках (рис.4-5) рассмотрена динамика набора прочности образцов, обладающих наиболее удовлетворительными показателями по плотности.



**Рис. 4.** Динамика набора прочности на сжатие в зависимости от возраста образца.



**Рис. 5.** Динамика набора прочности на изгиб в зависимости от возраста образца.

Технологические свойства испытываемых пенобетонных смесей приведены на гистограммах (рис.6-7).



**Рис. 6.** Подвижность смеси.

На основании полученных результатов выведены статистические модели, описывающие зависимости прочности образцов на сжатие, прочности образцов на растяжение, плотности образцов и подвижности пенобетонной смеси от количественного содержания вводимых компонентов (таблица 2).

Таблица 2. Статистические модели полученных результатов.

Наименование показателя	Уравнение регрессии
Прочность на сжатие на 28 сут.	$R_{сж28} = 11,11 + 1,4x_1 - 2,98x_2 + 0,85x_3 + 0,23x_1^2 + 1,81x_2^2 - 0,55x_1x_2 + 0,16x_1x_3 - 0,14x_2x_3$
Прочность на изгиб на 28 сут.	$R_{изг28} = 3,02 + 0,27x_1 - 0,58x_2 + 0,17x_3 + 0,2x_2^2 + 0,07x_3^2 - 0,06x_1x_2 - 0,03x_1x_3 - 0,08x_2x_3$
Плотность на 28 сут.	$\rho = 1640,75 + 93,97x_1 - 134,64x_2 + 68,62x_3 - 8,48x_1^2 + 11,04x_2^2 - 11,97x_3^2 - 1,24x_1x_2 + 7,62x_1x_3 - 8,02x_2x_3$
Распльв конуса	$P = 28,57 - 0,41x_1 + 1,59x_2 - 0,92x_3 - 0,99x_1^2 - 1,43x_2^2 - 0,67x_3^2 - 0,13x_2x_3$

## ВЫВОДЫ

Результаты выполненных экспериментов показывают, что увеличение количества кварцевого песка и барийсодержащей добавки способствует увеличению прочности материала на сжатие и на изгиб, а увеличение количества раствора пенообразователя, приводит к снижению данных показателей.

Исследование подвижности смеси показало, что введение барийсодержащей добавки снижает подвижность смеси больше, чем введение кварцевого песка, однако, поскольку пенообразователь в данном случае выступает в качестве поверхностно активного вещества, даже при наибольшей концентрации барита, подвижность сохраняется на высоком уровне.

На основании полученных данных, отобраны 5 вариантов составов пенобетонной смеси для достижения требуемых характеристик композиционного материала по высокой прочности и низкой плотности (составы №2, 4, 5, 7, 11). Исходя из того, что основными факторами, влияющими на радиационно-защитные свойства материала, являются его плотность и концентрация в составе элементов с высокими атомными номерами, наиболее целесообразным является применение в качестве облегченных блоков для защиты от ионизирующих излучений состава, содержащего в процентных долях от массы вяжущего 39% кварцевого песка, 53% раствора пенообразователя и 30% тонкомолотой барийсодержащей добавки (состав №2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Е.В., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А. Радиационно-защитные и коррозионностойкие серные строительные материалы. М.: Изд-во «Палеотип». 2006. 272 с.
2. Калашников В.И., Демьянова В.С., Калашников Д.В., Махамбетова К.Н. Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации // Строительные материалы. 2011. №8. С. 25-28.
3. Сопин Д.М., Ключев С.В., Агеева М.С. Разработка составов радиационно-защитного бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. №5. С.24-33.

4. Федюк Р.С., Муталибов З.А., Пак А.А., Лесовик В.С. Современные композиты для объектов ядерной отрасли. //Фундаментальные основы строительного материаловедения : сб. тр. Междунар. конгресса. 2017. С. 1107-1116.
5. Калашников Д.В. Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2001. 201 с.
6. Комаровский, А.Н. Защитные свойства строительных материалов: монография /А. Н. Комаровский. М.: Атомиздат, 1971. 238 с.
7. Патент 2440314 Российская Федерация, С04В 28/14, G21F 1/04, С04В 111/20. Способ получения строительной плиты на основе сульфата кальция/сульфата бария / Кремер Г., Шеллер Л., Фогель П., Гребнер Г., Хуммель Х.-У.; заявитель и патентообладатель КНАУФ ГИПС КГ. № 2010117693/03; заявл. 06.10.2008; опубл. 20.01.2012. Бюл. № 2.
8. Патент 2443645 Российская Федерация, С03С 11/00. Шихта для изготовления пеностекла с радиационно-защитными свойствами /Казанцева Л.К.; заявитель и патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН (Институт геологии и минералогии СО РАН, ИГМ СО РАН) № 2010134203/03; заявл. 16.08.2010; опубл. 27.02.2012. Бюл. № 6.
9. Патент 2388715 Российская Федерация, С04В 28/30, G21F 1/04, С04В 111/20. Сухая строительная смесь / Гончаров Ю.Д., Рыжов А.С.; заявитель и патентообладатель ООО «Альфапол». № 2008142229/03; заявл. 16.10.2008; опубл. 10.05.2010. Бюл. № 13.
10. Иванова П.В. Защита жилых помещений от электромагнитных полей и ионизирующих излучений // Строительство-2014: современные проблемы промышленного и гражданского строительства : мат. Междунар. науч.-практич. конф. 2014. С.63-65.
11. Дубровский В.Б., Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений. – М.: Стройиздат, 1983. – 240 с
12. Самченко С.В., Давидюк А.Н., Новиков Н.В. Влияние дисперсности барийсодержащей добавки для радиационно-защитных композиционных материалов на физико-механические свойства цемента // Техника и технология силикатов. 2021 Т. 28 №3. С. 95 – 100.
13. Новиков Н.В., Самченко С.В. Изучение влияние тонкомолотой барийсодержащей добавки на свойства композиционного материала. // Строительное материаловедение: настоящее и будущее : Сб. мат. II Всерос. науч. конф. 2021. С. 38-42.
14. Новиков Н.В., Самченко С.В. Разработка барийсодержащих ячеистых бетонов специального назначения. // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : Сб. мат. II нац. конф. 2021 г. С. 272-275.
15. Новиков Н.В., Самченко С.В. Изучение совместного влияния порообразователя и тонкомолотой барийсодержащей добавки на свойства цементной матрицы. //мат. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. 2022 г. С. 124-126.
16. Şensoy A.T., Gökçe H.S. Simulation and optimization of gamma-ray linear attenuation coefficients of barite concrete shields // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119218
17. Demir İ., Gümüş M., Gökçe H.S. Gamma ray and neutron shielding characteristics of polypropylene fiber-reinforced heavyweight concrete exposed to high temperatures // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 257. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119596.
18. Totsawat Daungwilailuk, Chadet Yenchai, Wisarute Rungjaroenkitti Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 326. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126838.
19. Khaled Saidani, Lasaad Ajam, Mongi Ben Ouezdou. Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties. // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 95. P. 287-295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.140.
20. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Изд-во «МИР». 1977.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ФУНДАМЕНТОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ЛАБОРАТОРНЫМ МЕТОДОМ

Л.С. Заровная<sup>1</sup>, Т.А. Лысенко<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2,

<sup>1</sup>zls66@mail.ru

<sup>2</sup>Lysenkotanyaa@mai.ru

## Аннотация

В статье рассматривается частный случай бетонирования монолитной железобетонной конструкции на основе которого произведен лабораторный опыт по проверке на прочность части конструктивного элемента специального сооружения. Описан процесс организации строительства на этапе заложения фундамента. Раскрыт метод обнаружения предела прочности конструктивного элемента. Сформулирован вывод о значимости прочностных характеристик монолитных железобетонных зданий и сооружений.

## ВВЕДЕНИЕ

Долговечность здания или сооружения напрямую зависит от исправного состояния фундамента. Разработанные проектные решения должны удовлетворять требованиям безопасности. Для каждой проектной ситуации и их сценария следует проверить, что невозможно достижение ни одного из предельных состояний в соответствии с требованиями ГОСТ 27751, настоящего свода правил. [1]

Конструкция железобетонного монолитного фундамента на этапе строительства также подвергается ряду испытаний, чтобы предостеречь постепенное понижение уровня эксплуатационных характеристик материалов, процесса их изменения в сторону ухудшения относительно проектных значений.

Заблаговременная проверка основания фундамента на прочность позволит в дальнейшем избежать ряд нарастающих со временем проблем, таких как:

- Снижение срока службы;
- Увеличение материальных затрат.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Надежность строительных конструкций и оснований следует обеспечивать на стадии разработки общей концепции сооружения, при его проектировании, изготовлении его конструктивных элементов, строительстве и эксплуатации. [2]

Любая возводимая конструкция из железобетона на стадии производства работ по возведению фундаментов подвергается ряду проверок, вследствие которых допускается производить последующие строительные-монтажные работы.

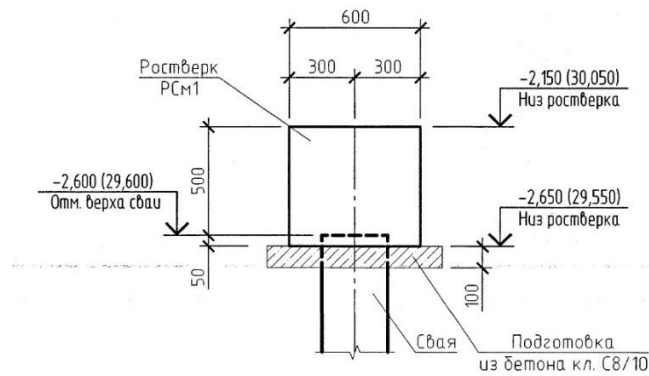
Для того, чтобы убедиться, что монолитная железобетонная конструкция набрала необходимую прочность, необходимо подтвердить это при помощи лабораторного опыта.

Контроль и оценку прочности бетона выполняют при производственном контроле нормируемых показателей качества бетонных смесей, а также бетонных и железобетонных изделий, сборно-монолитных и монолитных конструкций. [3]

В случае, когда доступ к бетону ограничен конструктивными решениями, применяется неразрушающий метод проверки прочности целостной конструкции согласно ГОСТ 18105-2018 по схеме Г.

Данная схема контроля являет собой метод выявления нормируемой прочности без прямого определения характеристик однородности бетона.

Сам процесс организации эксперимента состоит из нескольких частей. Рассмотрим частный пример – бетонирование ростверка.



**Рис. 1.** Деталь заделки сваи в ростверк.

Данная конструкция состоит из бетона класса В25, марки водонепроницаемости W8 и марки морозостойкости F100.

Сопряжение свай с ростверком – шарнирное.

Устройство сооружений из монолитного железобетона производится в следующей последовательности:

- Армирование арматурой;
- Устройство опалубки;
- Проверка правильности установленной арматуры, опалубки;
- Устранение всех дефектов;
- Проверена работа всех механизмов, исправность приспособлений оснастки и инструментов;
- Укладка бетонной смеси в опалубку и формы контрольных образцов;
- Выдержка бетона и уход за бетоном;
- Снятие опалубки.

Далее производится приемка законченной железобетонной конструкции. При приемке законченных бетонных и железобетонных конструкций следует проверять:

- Соответствие конструкций рабочим чертежам;
- Качество бетона по прочности;
- Качество применяемых в конструкции материалов и изделий.

Места отбора образцов (проб) для лабораторных испытаний и места для проведения испытаний неразрушающими методами следует устанавливать на характерных участках конструкций с учетом действующих нагрузок и воздействий, напряженно-деформированного состояния обследуемых элементов, конструктивных решений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Монолитные конструкции из бетона одного проектного класса, изготовленные в течение определенного интервала времени имеют единое значение прочности. Согласно ГОСТ18105-2018 производился контроль и оценка прочности по формуле:

$$R_T = K_T B_{\text{норм}}, \quad (1)$$

где  $R_T$  - требуемая средняя прочность бетона при контроле качества бетонной смеси или изделия в контролируемой партии или в контролируемом периоде, МПа;

$K_T$  - 1,28 (согласно таблице А.3 приложения А)

$B_{\text{норм}}$  - нормируемая прочность бетона, МПа.

Для ростверков РСм1: два образца размером 100x100x100 мм испытывают согласно схеме «Г» [3], т.е. без прямого определения характеристик однородности бетона по прочности.

Результаты испытаний образцов на 7-ые сутки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства.

№ образца	Возраст, сутки	Размер образца, мм	Масса образца, г.	Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности при сжатии, МПа
№Б/РСм/1	7	100x100x100	2352	240	22,8
№Б/РСм/2	7	100x100x100	2350	238	22,6
				$R_{cp7} =$	22,7
				$R_{m7} =$	22,7
				$R_{m7} \geq R_{T7}$	22,7 > 22,4

По ГОСТ 18105-2018 фактическая прочность партии бетонной смеси  $R_{m7}=22,7$  МПа, что больше требуемой прочности  $R_{T7}=22,4$  МПа ( $R_{m7} > R_{T7}$ ) и соответствует прочности бетона на 7 сутки класса В25.

Результаты испытаний образцов на 28-ые сутки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-механические свойства.

№ образца	Возраст, сутки	Размер образца, мм	Масса образца, г.	Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности при сжатии, МПа
№Б/РСм/1	28	100x100x100	2343	345	32,8
№Б/РСм/2	28	100x100x100	2340	346	32,6
				$R_{cp28} =$	32,7
				$R_{m28} =$	32,7
				$R_{m28} \geq R_{T28}$	32,7 > 32,0

По ГОСТ 18105-2018 фактическая прочность партии бетонной смеси  $R_{m28}=32,7$  МПа, что больше требуемой прочности  $R_{T28}=32,0$  МПа ( $R_{m7} > R_{T7}$ ) и соответствует прочности бетона на 28 сутки класса В25.

## ВЫВОД

Неразрушающий метод, представленный в данной статье, является наиболее приемлемым для определения прочностных физико-механических характеристик строительных материалов в условиях, когда эти свойства устанавливаются для сооружения на стадии изготовления его конструктивных элементов.

Исходя из содержания можно сделать вывод, что предел фактической прочности образца больше, чем требуемый. Данный результат может быть достигнут при правильном процессе организации строительства. Обеспечив надежность фундамента на этапе застройки возможно избежать дальнейшие непредвиденные материальные затраты и обеспечить заблаговременно надежность сооружения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений // Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* // Дата введения 2017-07-01.
2. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований // Основные положения // МКС 91.040.01 // Дата введения 1 июля 2015 года.
3. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности // МКС 91.100.30 // Дата введения 2020-01-01.
4. СП 45 13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты // Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 // Дата введения 2017-08-28.
5. СП 435.1325800.2016 Конструкции бетонные и железобетонные монолитные // Правила производства и приемки работ // Издание официальное // Москва 2019
6. *Далматов Б.И.* Механика грунтов, основания и фундаменты. Учеб. для вузов. - 2-е изд., доп. - М.: Высш. шк., 1981.
7. *М.В.Берлинов* Основания и фундаменты: Учебник. 4-е изд., испр. — СПб.: Издательство «Лань», 2011 — 320 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).



## ПОДБОР СОСТАВОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА РЯДОВОМ СЫРЬЕ ТУЛЬСКОГО РЕГИОНА

Д.А. Лежебоков<sup>1</sup>, А.В. Барковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «ТУЛА-БЕТОН», г. Тула,

<sup>2</sup>ООО «Центр качества «СтройКонтроль», г. Тула,

<sup>1</sup>6833083@gmail.com

<sup>2</sup>ck\_stroikontrol@mail.ru

### Аннотация

В виду необходимости снижения себестоимости продукции и повышения её конкурентоспособности, применение местной сырьевой базы является необходимой мерой на производстве, при этом составы бетонных смесей должны соответствовать всем необходимым критериям качества выпускаемой продукции. В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния ряда химических добавок на качественные показатели бетона, при использовании в его составе инертных материалов Тульского региона.

### ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль со временем меняется, изменяются не только технологические предпосылки использования бетонов, но и экономические. В настоящее время при производстве товарных бетонных смесей, а также железобетонных материалов и изделий, необходимо учитывать не только расширение архитектурных решений, качество готового продукта, скорость возведения объектов, немаловажным является и современная экономическая ситуация, а именно, стоимость выпускаемых материалов. Таким образом, одной из задач современного производителя является получение бетонных смесей и бетонов с требуемыми техническими характеристиками и низкой себестоимостью. Решение вопроса по снижению затрат на производство строительных материалов всегда актуально, поскольку существующие технологии являются достаточно материалоемкими и энергоемкими процессами.

Бетон на сегодняшний день – это высокопрочный материал, наиболее широко применяющийся в строительной отрасли. Более 4 млрд. м<sup>3</sup> – это мировой объем производства бетона. Химические добавки позволяют эффективно управлять свойствами и структурированием бетона, так, например, в 1,5 – 2 раза повышать прочностные характеристики бетона при одинаковом В/Ц, увеличивать его долговечность. На их основе создаются различные многокомпонентные высокофункциональные бетоны [1, 7].

Ранее качество бетона определялось маркой цемента, качество заполнителей по прочностным показателям, водостойкости и морозостойкости, а также качество воды затворения было рекомендовано высоким, но на строительной площадке почти не возможно в полной мере обеспечить необходимое качество, рекомендуемое в литературных источниках и научных трудах, кроме воды затворения. Пути улучшения качества бетона и повышения его прочности стали способы уплотнения (виброуплотнение, поличастотное виброуплотнение, вибровакуумирование и т.п.). При рассмотрении энергосберегающих бетонов, беря во внимание не технологические, а экономические показатели, можно выделить бетоны на шлакопортландцементе и бетоны с утилизацией отходов промышленности. С 1930-х г.г. значимым этапом развития бетонов стало использование пластифицирующих добавок (например, лигносульфонатов или СДБ), такие добавки дали повышение прочности, долговечности бетонов, а также экономию портландцемента. Модифицированные лигносульфонаты и в настоящее время включены в стандарты ряда стран, как пластификаторы бетонных смесей [2].

Значительный вклад в развитие индустрии внесло изобретение в Японии сильных пластификаторов на нафталинсульфонатной основе. Производство бетонных смесей на

данных видах добавок осуществляется и в настоящее время. Этот этап стал революционным – применение суперпластификаторов позволило повысить прочность бетонов из пластичных и высокопластичных смесей до 75 – 85 МПа, а расходы вяжущего вещества сократить на 25 – 35 % [2, 3].

Можно выделить три основных класса химических добавок пластификаторов и суперпластификаторов: на основе лигносульфонатов; сульфированные меламинформальдегиды или нафталинформальдегиды; поликарбоксилатные эфиры [4].

Химические добавки способны оказывать полифункциональное действие на физико-механические характеристики материалов, модифицировать свойства материала, как на стадии технологии его производства, так и эксплуатационные свойства. Эффективными модификаторами структуры и свойств бетонных смесей являются химические добавки, в первую очередь пластификаторы и суперпластификаторы (ПАВ – поверхностно-активные вещества). Явление адсорбционного модифицирования процесса кристаллизации гидратных новообразований, имеющих место при введении ПАВ в цемент, и научное обоснование применения поверхностно-активных добавок впервые разработано П.А. Ребиндером, а затем развито А.Н. Адамовичем, С.В. Шестоперовым, В.Е. Сегаловой и др. [5]. При введении добавок ПАВ, которые обладают пластифицирующим действием, при их адсорбции в основном на гидратных новообразованиях уменьшается межфазовая энергия и облегчается дефлокуляция (деагрегация) частиц. При этом освобождается некоторая часть воды, иммобилизованной флоккулами гидратируемых частиц, что и обуславливает пластифицирующий эффект. Адсорбционные слои ПАВ сглаживают микрорельеф частиц, тем самым уменьшая коэффициент трения между ними [6].

В механизме действия суперпластификаторов имеет значение возникновение на частицах твердой фазы электрокинетического потенциала ( $\xi$  – потенциала), что приводит к предотвращению коагуляции и отталкиванию частиц. Для некоторых добавок типа поликарбоксилатных суперпластификаторов взаимное отталкивание частиц цемента и пластифицирующий эффект определяются в большей степени стерическим эффектом, который вызван формами цепей макромолекул и характером зарядов на поверхности зерен цемента и гидратов [6].

Цель данной работы заключалась в определении оптимального вида химической добавки для возможного использования в бетонных смесях на известняковом заполнителе. Данные бетонные смеси и бетоны на их основе должны без потери качественных показателей, на сырьевых материалах Тульского региона, отвечать требованиям приемлемой себестоимости для строительных площадок. В работе ставилась задача получения бетона класса В25, как наиболее широко применяемого класса на объектах гражданского строительства Тульской области.

Производственный состав должен обеспечивать нормируемые показатели качества бетонных смесей по ГОСТ 7473 и ГОСТ 26633, а именно:

1. Подвижность бетонной смеси должна соответствовать требуемой марке по удобоукладываемости.
2. Сохраняемость свойств бетонной смеси во времени не менее 2-х часов.
3. Нормативная прочность на сжатие не менее 32 МПа.
4. Марка бетона по водонепроницаемости не ниже W8.
5. Марка бетона по морозостойкости не менее F<sub>1</sub>100.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В ходе выполнения экспериментальных исследований в качестве вяжущего использовался портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н производства АО «Липецкцемент».

Крупный и мелкий заполнитель в бетоне представлен известняковым щебнем фракции 5 – 20 мм и песком природным группы мелкий с модулем крупности 1,5 – 1,7. Данное сырье поставляется на производственные площадки с ряда карьеров Тульской области.

Химические добавки от различных производителей:

- компания «BASF»: MasterGlenium 320, MasterPolyheed 3553, MasterPolyheed 3510, MasterPozzolith MR25;
- ООО «Полипласт-Новомосковск»: Линамикс ПК, Полипласт СП-3;
- ООО «Техноград-Восток»: DAO EZCON HPA 560;
- компания «SIKA»: SIKA S-35, SIKA E2.

Исследования проводились на составах с одинаковым расходом сырьевых материалов (цемент, песок, щебень), расход воды регулировался до получения подвижности бетонной смеси марки П4.

Подбор составов бетона проводился в соответствии с требованиями ГОСТ 27006.

Свойства бетонной смеси: подвижность бетонной смеси, сохраняемость свойств во времени оценивались по ГОСТ 10181.

Оценка прочности на сжатие, водонепроницаемости, морозостойкости по ГОСТ 18105, ГОСТ 10180, ГОСТ 10060, ГОСТ 12730.5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными этапами проведенных экспериментальных исследований являлись следующие:

1. Определение порогов эффективности действия добавок.
2. Проведение опытных замесов и корректировка рабочих составов.
3. Испытание образцов на нормируемые показатели качества.

При определении порогов эффективности действия добавок оценивались такие свойства, как водоредуцирующий эффект добавки и влияние их на сохраняемость свойств бетонной смеси, как одно из основных свойств при производстве товарных бетонов.

Были проведены испытания диапазонов добавок, диапазон добавки закрывался при отсутствии снижения воды в составе бетона. На основании оценки сохраняемости свойств бетонной смеси из диапазона каждой добавки был выделен один расход по каждой добавке, при котором сохраняемость свойств бетонной смеси соответствовала заданной. На рисунке 1 приведены результаты снижения водопотребности бетонной смеси при оптимальном содержании добавки в ее составе.

Результаты определения порогов эффективности добавок (оптимальный расход добавки, % от массы цемента) приведены в таблице 1.



**Рис. 1.** Водоредуцирующий эффект добавок при их оптимальном расходе

Таблица 1 – Результаты определения основных свойств бетонной смеси и бетона с введением добавок оптимального количества

Вид добавки	Расход добавки, % от массы цемента	ОК, см	ОК через 120 мин, см	Средняя плотность бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>	Предел прочности при сжатии, МПа в возрасте, сут.		
					3	7	28
ООО «Полипласт-Новомосковск»							
СП-3	1,2	20	16	2340	18,1	24,5	33,4
Динамикс ПК	1,0	22	14	2350	15,4	24,3	35,8
ООО «Техноград-Восток»							
DAO EZCON НРА 560	0,6	20	17	2370	16,5	24,1	35,3
компания «BASF»							
MasterGlenium 320	0,8	19	16	2360	14,5	23,1	33,6
MasterPolyheed 3510	1,0	18	16	2353	13,1	21,0	30,7
MasterPolyheed 3553	1,0	19	16	2347	16,1	23,4	34,1
MasterPozzolith MR25	0,8	19	18	2365	16,1	22,5	32,3
производство компании «SIKA»							
SIKA S-35	1,1	19	15	2310	13,5	20,7	30,3
SIKA E2	1,0	18	15	2320	19,2	27,1	38,3

По результатам таблицы 1 видно, что добавками, дающими наибольший рост прочности в ранние сроки, что является одним из важных факторов применения бетонных смесей в условиях монолитного домостроения, являются Полипласт СП-3 и SIKA E2. В возрасте 28-ми суток наилучшие показатели по прочности на сжатие показали добавки SIKA E2, DAO EZCON НРА 560 и Динамикс ПК. Введение добавок MasterPolyheed 3510, SIKA S-35 в составы бетонных смесей не обеспечивает нормируемой для данных производственных составов прочности на 28 суток н.у. твердения. Минимальную сохраняемость свойств бетонной смеси показала добавка Динамикс ПК, применение данной добавки не дает сохранения марки по подвижности бетонной смеси.

По результатам испытаний на морозостойкость и водонепроницаемость, отобранных образцов бетона, все рассматриваемые в данной работе добавки обеспечивают получение марок бетона по водонепроницаемости W8 и морозостойкости не менее F<sub>100</sub>.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, применение в составах товарного бетона современных суперпластификаторов обеспечивает получение качественных бетонных смесей на инертных материалах Тульского региона, при условии их использования в оптимальных дозировках. Наряду с этим одним из решающих факторов внедрения в производство той или иной добавки является учет её вовлеченной стоимости в продукции для обеспечения конкурентоспособности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны / Ю. М. Баженов // Технологии бетонов. – 2012. – № 3-4(68-69). – С. 39-42.

2. *Калашников В.И.* Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В. И. Калашников // Технологии бетонов. – 2015. – № 11-12(112-113). – С. 27-35.
3. *Калашников В.И.* Через рациональную реологию в будущее бетонов / В.И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. - №5. – С. 8 – 10.
4. *Курятников Ю.Ю.* Исследование эффективности суперпластификаторов на основе полиметиленафталинсульфокислот и поликарбоксилатных эфиров // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2021, №4 (12). – С. 95 – 100.
5. *Карибаев К.К.* Поверхностно-активные вещества в производстве вяжущих материалов / К.К. Карибаев. – Алма-Ата: «Наука» КазССР, 1980. – 336 с.
6. *Дворкин Л.И.* Строительные минеральные вяжущие вещества / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – М.: Издательство «Инфра-Инженерия», 2011. – 544 с.
7. *Баженов Ю.М.* Современная технология бетона / Ю.М. Баженов // Строительное материаловедение-теория и практика. – М.: изд-во СИПРИА, 2006. – С.13 – 16.

# ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЛАСТИФИКАЦИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ

С.Ю. Обухова<sup>1</sup>, А.О. Карпунина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>ООО «ЛЛК-Интернешнл»,

<sup>1</sup>ShehovtsovaSYU@mgsu.ru

<sup>2</sup>Angelina-line@yandex.ru

## Аннотация

Повышение безопасности и долговечности покрытий автомобильных дорог сохраняет как научную, так и практическую актуальность. Самостоятельным способом модифицирования нефтяных битумов является введение измельченной резины, полученной путем комплексной переработки изношенных автомобильных покрышек и других резинотехнических изделий. Данный способ содержит как очевидные преимущества, так и негативный опыт эксплуатации асфальтобетонов, модифицированных резиновой крошкой. Для устранения недостатков технологии модифицирования битумов резиновой крошкой разработано несколько перспективных способов, которые, как правило, заключаются в деструкции поверхности резины вследствие сильных сдвиговых воздействий, воздействием ионизирующего излучения или обработкой девулканизатором. Однако для этих способов сохраняется проблема диспергирования в расплаве битума вследствие значительного возрастания площади поверхности резинового модификатора и/или изменения смачиваемости поверхности. Как следствие отсутствие однородного распределения резиновой крошки и формирование агрегатов, состоящих из несмоченных частиц, приводит к интенсивному трещинообразованию, особенно в низкотемпературный период эксплуатации. В этой связи мировым сообществом разрабатываются другие способы модифицирования битумов резиновой крошкой и уделяется значительное внимание изучению механизма взаимодействия резиновых частиц с битумным вяжущим в различных условиях. В статье представлена информация о текущем состоянии данного вопроса и проанализированы результаты последних исследований в данной области.

## ВВЕДЕНИЕ

Производство асфальтобетона с добавлением резиновой крошки осуществляется главным образом двумя способами, получившими названия «сухой» и «мокрый». Различия данных способов заключаются в том, что сухой способ предполагает добавление резиновой крошки в минеральные наполнители асфальтобетона, а мокрый способ – ввод резиновой крошки при высокой температуре в битумное вяжущее, которое затем используется при производстве асфальтобетона.

Наибольший интерес для нашего исследования представляет так называемый мокрый способ получения резиноасфальтобетона. Суть данного способа заключается в том, что он позволяет получить модифицированное резино-битумное вяжущее (РБВ) с улучшенными эксплуатационными свойствами по сравнению с исходным битумом за счет действия частиц резины. По данным исследований [1-4] получение РБВ достигается путем набухания, частичной девулканизации, диспергирования и растворения резиновой крошки в битумном вяжущем. Причем достичь этого результата можно с использованием двух технологических решений – с наличием или отсутствием предварительной стадии пластификации резиновой крошки. Первая технология предусматривает введение в битумное вяжущее предварительно выдержанную резиновую крошку в пластификаторе ароматической природы при температуре до 230 °С в течение нескольких часов [2]. Вторая технология построена на введении резиновой крошки в битумное вяжущее в

условиях продолжительного перемешивания под воздействием температуры 180-200 °С в течение 45 минут – 6 часов [2].

Таким образом, при получении резино-битумного вяжущего принципиальное значение имеют такие факторы, как состав пластификатора или самого битумного вяжущего, размеры и поверхность резинового модификатора, концентрация резиновой крошки и состав РБВ, температура и продолжительность процесса приготовления.

Следовательно, получение асфальтобетонов с резиновой крошкой имеет определенную вариативность, влияющую на результативность данного процесса. Данное исследование посвящено изучению существующего опыта получения резино-битумных вяжущих.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Объектом исследования данной работы являлся механизм термомеханической пластификации резиновой крошки. В данном исследовании был проведен анализ существующих подходов и разработок в области приготовления резино-битумных вяжущих, изучены результаты современных отечественных и зарубежных экспериментальных изысканий. Исследование основано на методах системного анализа и обобщения научно-технической информации.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В исследованиях отечественных и зарубежных авторов установлено, что лучший результат достигаемых свойств дорожного асфальтобетона возможен при любой технологии введения резиновой крошки при условии ее тонкого измельчения. Имеющиеся данные исследований [5, 6] показывают, что степень измельчения резины – принципиально важный показатель, т. к. даже мелко измельченная резиновая крошка (до 1 мм) не растворяется в битуме, а находится в нем в виде частично набухшей дисперсной фазы.

В исследовании [7] изучались условия, необходимые для диспергирования резиновой крошки до размеров, не превышающих 0,1 мм. В частности изучалась зависимость температуры и времени получения РБВ от размеров исходной крошки. Первоначально получали концентрированную суспензию, а затем – конечное резино-битумное вяжущее. В работе использовалась резиновая крошка с размерами 3-5 мм, но для ее полного смачивания пластификатора оказалось недостаточно, что потребовало дополнительного количества вяжущего и не позволило получить суспензию с размерами частиц менее 1 мм. Попытка увеличения температуры до 235-245 °С не дала ожидаемого эффекта, т. к. это вызвало выгорание пластификатора, в результате чего резиновые частицы оказались не полностью смоченными и распадались на низкомолекулярные соединения в течение 3,0-3,5 ч. Результаты данного исследования позволили сделать вывод о том, что резиновая крошка для целей получения РБВ с улучшенными эксплуатационными свойствами должна быть размером не более 1-3 мм.

В исследовании [8] изучалась взаимосвязь качества РБВ и стадийности его получения. Способ предварительного пластифицирования резиновой крошки в масле был отвергнут в связи с тем, что большое количество масла, требующееся для пластификации, дает снижение вязкости и теплостойкости получаемого РБВ. Были апробированы новые способы приготовления РБВ, в частности: 1) одностайдиный способ – одновременная загрузка и переработка в реакторе всех компонентов будущего РБВ; 2) двухстадийный способ – с первой стадией получения концентрированной суспензии резино-битумной композиции посредством предварительной термомеханической обработки 37,5 % резиновой крошки в среде, состоящей из 50 % битума и 12,5 % нефтяного масла, и второй стадией совмещения 52 % полученной композиции и 48 % битума; 3) модификация второго способа, заключающаяся в техкратном введении резиновой крошки равными частями.

Полученные авторами исследования [8] результаты свидетельствуют о том, что сравнительно лучшие показатели получения РБВ достигаются при втором способе, когда первоначально готовится концентрированная суспензия резино-битумной композиции, а затем она добавляется в битум.

Экспериментальное исследование, направленное на изучение способов получения и улучшение свойств резино-битумного вяжущего [9], было построено на идее двухстадийного приготовления РБВ. На первой стадии 30-60 % резиновой крошки, измельченной до частиц размером не более 1,5 мм, термомеханическим способом перемешивается с 30-60 % нефтяного битума и 10-25 % нефтяного масла, содержащего не менее 50 % ароматических углеводородов. На второй стадии также термомеханически происходит смешение 30-60 % полученной смеси и 40-70 % битума нефтяного дорожного марки. Результаты исследования свидетельствуют о том, что такие асфальтобетонные смеси характеризуются более высокими показателями однородности, прочности, морозо-, трещино- и влагостойкости, устойчивости к высоким температурам, а также увеличением срока эксплуатации дорожных покрытий.

Таким образом, авторы ряда исследований [8-10] пришли к выводу о том, что технология получения РБВ обязательно должна включать предварительную стадию пластификации резиновой крошки. При этом исследователи рассматривали в качестве пластификатора такие продукты и вещества, как углеводородные масла, смолы, остаточные продукты и полупродукты нефтепереработки, по химическому средству близкие к резиновой крошке. Так в исследовании [10] на предмет улучшения процессов набухания и растворения резины изучалась возможность использования в качестве пластификатора углеводородных сред, содержащих большое количество высокомолекулярных ароматических соединений и смол. Испытаниям на растворяюще-диспергирующую способность по отношению к резине подверглись такие вещества, как асфальтит, тяжелый газойль каталитического крекинга, экстракт селективной очистки масел и прямогонный гудрон. Методы флуоресцентной микроскопии позволили выявить, что тяжелый газойль каталитического крекинга и экстракт селективной очистки масел обладают лучшей растворяюще-диспергирующей способностью по отношению к резине. Превосходство данных углеводородных сред над остальными диспергирующими агентами объясняется высоким соотношением парафино-нафтеновых веществ и асфальтенов и соответственно более низкой вязкостью системы [10].

Проводились также исследования, направленные на изучение влияния добавки нефтеполимерной смолы на качество получаемых РБВ. Так, авторами исследования [11] было установлено, что возрастание содержания нефтеполимерной смолы в резино-битумном вяжущем приводит к снижению температуры размягчения РБВ и увеличению их пенетрации. Совместимость нефтяного битума и резиновой крошки зависит от введения нефтеполимерной смолы в РБВ. Улучшение данной совместимости происходит за счет деструкции и сшивки частиц резины и конденсированных компонентов битума в присутствии смол. Авторы другого исследования [12] не разделяют это мнение и считают, что пластифицирование резиновой крошки смолами и высокомолекулярными ароматическими углеводородами битумов не приводит к заметному улучшению свойств резино-битумного вяжущего. По их мнению, данный эффект является следствием стеклования этих компонентов при высоких температурах.

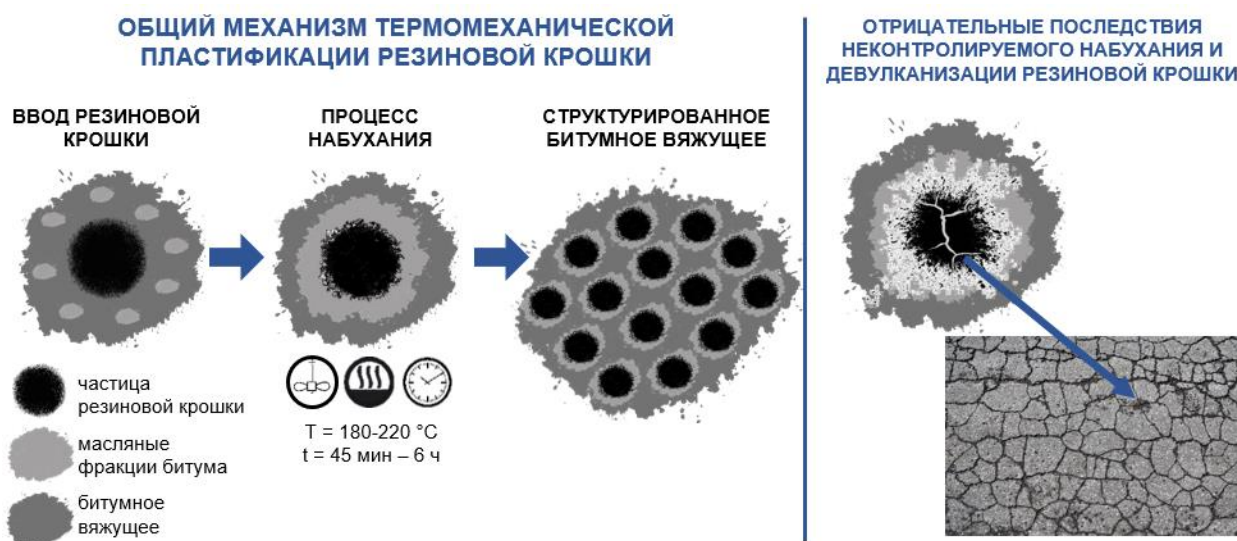
Обладатели патента «Битумно-резиновая композиция и способ ее получения» [13] считают, что в качестве эффективного и действенного девулканизатора и растворителя резиновой крошки является нафталиновая фракция каменноугольной смолы. Растворение крошки размером 5-7 мм происходит при температуре 200-230 °С за 3-4 часа. Авторы отмечают, что содержание неоднородностей (частиц резиновой крошки) в РБВ размером менее 0,1 мм не влияет на физико-механические свойства конечного асфальтобетона, и нецелесообразно увеличивать продолжительность процесса получения РБВ для дальнейшего уменьшения размеров частиц резиновой крошки.



Научно-практический интерес представляют исследования способа пластификации резиновой крошки [12, 14]. Так, в исследовании [14] отмечается, что пластификация резиновой крошки достигается путем пропускания набухшей в нефтяном битуме резины через аппарат-пластификатор при 225-235 °С от 30 минут до нескольких часов. При этом набухшая резина постепенно пластифицируется и органические компоненты переходят в раствор [14]. Автор другого исследования [12] считает, что при температуре приготовления РБВ выше 208-230 °С в резиновой крошке, введенной в битум, преимущественно происходят деструктивные процессы, которые в зависимости от длительности и температуры процесса могут привести к полному разрушению резины и образованию низкокипящих углеводородов, являющиеся разжижителями битума и негативно сказывающихся на качестве конечного РБВ.

Изучение приведенных исследований, анализ и сопоставление полученных результатов позволили обнаружить отсутствие доказательных исчерпывающих данных о физических и химических механизмах, приводящих к получению резино-битумных вяжущих с высокими эксплуатационными свойствами.

Таким образом, в большинстве случаев авторы сходятся во мнении, что в процессе термомеханической пластификации (при совместном температурном и механическом воздействии) измельченная резина набухает в масляных фракция битума, за счет чего происходит ослабление межмолекулярных связей в резине. Продолжающийся подвод тепла и механические воздействия приводят к разрыву по этим ослабленным связям в резине, и осуществляется девулканизация резины с образованием каучукового вещества, которое структурирует битум [10, 14]. Данный механизм схематично представлен на рисунке 1. Таким образом, именно структурирующей функцией каучукового вещества объясняется улучшение качества резино-битумного вяжущего и асфальтобетона на его основе.



**Рис. 1.** Общий механизм термомеханической пластификации резиновой крошки.

## ВЫВОДЫ

Изучение отечественных и зарубежных исследований позволило сделать выводы о том, что в настоящее время еще не сформировано единое научное знание о физических и химических механизмах, приводящих к получению резино-битумных вяжущих с улучшенными качественными характеристиками. Поэтому поиск более совершенных подходов к получению асфальтобетона на основе резино-битумных вяжущих продолжается. Изыскания производятся как в направлении поиска методов модифицирования битумов резиновой крошкой, способов улучшения свойств и качества резино-битумного вяжущего в асфальтобетоне, так и выявления подробного и

достоверного механизма взаимодействия резиновых частиц с битумным вяжущим в различных условиях.

Анализ научно-технической литературы по проблеме термомеханической пластификации резиновой крошки [1-14] показал, что для ее разрешения принципиальное значение имеют такие показатели, как равномерность девулканизации резины и физико-химические свойства РБВ. Данные показатели в свою очередь зависят от отношения максимального размера резиновой крошки к минимальному и от размера частиц резиновой крошки. По мнению исследователей, в идеале он должен быть не более 1-3 мм. Кроме того, высокую значимость имеет предварительная обработка резиновой крошки в пластификаторах, имеющих высокое соотношением парафино-нафтеновых веществ и достаточное количество асфальтенов в своем составе.

Кроме того, обеспечение эффективного равномерного распределения резиновых модификаторов как в среде-носителе, так и в битумном вяжущем остается нерешенной проблемой. Отсутствие знаний об особенностях процесса структурообразования, объясняющих влияние различных факторов на эффективность процесса модификации битумов резиновой крошкой, приводит к вариативности результатов исследований и неоднозначности рекомендуемых технологических параметров. Это в свою очередь не позволяет эффективно управлять процессом растворения резиновой крошки в углеводородных средах и получать дисперсные системы с заданными эксплуатационными характеристиками и стабильностью.

Таким образом, поиск различных методов модифицирования битумов резиновой крошкой, раскрытие механизма взаимодействия резиновых частиц с битумным вяжущим в различных условиях, исследования способов улучшения свойств и качества резино-битумного вяжущего в асфальтобетоне должны иметь продолжение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Dong D., Huang X., Li X., Zhang L.* Swelling process of rubber in asphalt and its effect on the structure and properties of rubber and asphalt // *Construction and Building Materials*. 2012. № 29. P. 316-322.
2. *Галдина В.Д., Новиков В.С.* Использование резиновой крошки для модификации битумов // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство* : Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции, Омск. Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2021. С. 660-665.
3. *Руденский А.В., Никонова О.Н.* Резинобитумные вяжущие. Различные варианты технологии приготовления // *Дороги и мосты*. 2008. № 1(19). С. 215-223.
4. *Иванов С.А., Вахьянов Е.М., Шабаев С.Н.* Обоснование влияния технологии производства резинобитумного вяжущего на физико-химические свойства // *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова*. 2016. № 1(51). С. 222-228.
5. *Прокопец В.С.* Повышение эффективности дорожно-строительных материалов механоактивационным модифицированием исходного сырья: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.11. Изд-во БГТУ. 2005. 42 с.
6. *Алфимова Н.И., Калатоли В.В., Карацупа С.В., Вишневецкая Я.Ю., Шейченко М.С.* Механоактивации как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // *БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2016. № 6. С. 85-89.
7. *Шабаев С.Н., Иванов С.А., Вахьянов Е.М.* Влияние размера резиновой крошки на технологические параметры получения резино-битумного вяжущего // *Молодой ученый*. 2013. № 2 (49). С. 75-77.
8. *Иванов С.А., Шабаев С.Н.* Исследование влияния стадийности технологического процесса получения композиционных резинобитумных вяжущих на их свойства // *Вестник ВСГУТУ*. 2016. № 4. С. 153-158.
9. Патент №2655334 РФ. МПК C08L95/00, C08L17/00, C04B26/26. Композиционное резинобитумное вяжущее и способ его получения / Шабаев С.Н., Иванов С.А., Вахьянов Е.М.; Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. №2016118144; Заявл. 10.05.2016; Оpubл. 25.05.2018, Бюл. № 15.
10. *Нуеун Тхи Тхань Иен.* Разработка научно-технологических основ производства резиносодержащих дорожных вяжущих: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07. Москва, 2021. 119 с.
11. *Юрченко О.В., Никонов О.В., Смолко В.С., Шрубок А.О.* Влияние добавок нефтеполимерной смолы на пластические свойства резинобитумных вяжущих // *Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. Минск: БГТУ. 2018. № 1. С. 137-143.
12. *Галдина В.Д.* Модифицированные битумы: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2009. 228 с.

13. Патент №2327719 РФ. C08L 95/00, C08L 17/00, C08J 3/20. Битумно-резиновая композиция и способ ее получения / Алексеенко В.В., Кижняев В.Н., Верещагин Л.И., Житов Р.Г., Смирнов А.И., Митюгин А.В. № 2007113596/04; Заявл. 11.04.2007; Оpubл. 27.06.2008, Бюл. № 18.
14. Материалы из резиновых и каучуковых отходов [Электронный ресурс] // bibliotekar.ru. – Режим доступа: [http://www.bibliotekar.ru/spravochnik\\_110\\_stroitelnye\\_materialy/38.htm?ysclid=137fadg6k1](http://www.bibliotekar.ru/spravochnik_110_stroitelnye_materialy/38.htm?ysclid=137fadg6k1). Дата обращения: 01.04.2022.

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА НА ГИДРАТАЦИИ НА УДЕЛЬНО СОПРОТИВЛЕНИЕ ТОКОПРОВОДЯЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, А.М. Бахрах<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>*larsen.oksana@mail.ru*

<sup>2</sup>*antonbahrah@mail.ru*

### Аннотация

Представлено рассмотрение способов изготовления токопроводящего цементного камня, а также влияние его составляющих на электрическую проводимость. Предложены составы композиционного вяжущего получаемого совместным перемешиванием портландцемента ПЦ 500 Д0, технического углерода К-354 в количестве 15% и 30% по массе цемента, а также суперпластификатора на основе эфиров поликарбоксилатов. Представлен анализ данных об изменении удельного электрической проводимости при гидратации. Представлено сравнение динамики набора прочности и изменения удельного электрического сопротивления в зависимости от соотношения количества портландцемента и компонента, обеспечивающего электрическую проводимость.

### ВВЕДЕНИЕ

Проводимость бетонов применяется в электроэнергетике, строительстве, оборонно-промышленном комплексе [1-4]. Возможно выделить виды токопроводящих композитов от материала, образующего проводящую матрицу:

- минеральное вяжущее;
- полимерное вяжущее.

В строительстве актуально использование токопроводящего композита на основании портландцемента. Структура цементного камня подвержена таким процессам, как расширение и усадка [5].

Токопроводящие бетоны получают за счет введение дисперсных частиц, таких, как: технический углерод [6], кокс [7], углеродная фибра [8], металлическая стружка [9], углеродные нанотрубки [10, 11].

В работе [12] исследована зависимость электрической проводимости особо высокопрочного фибробетона. Максимальный объем фибры составил 3 % от общего объема. В образцы призмы при гидратации погрузили электроды, с помощью омметра измерено удельное электрическое сопротивление. Разрушение образцов привело к увеличению их проводимости. Измерения проводились по нескольким направлениям. Таким образом, повышение электрической проводимости вызвано усилением контактирования между фиброй.

В работе [13] представлено снижение электрического сопротивления при совместном применении таких компонентов, как: фибра из стали - 1-3 % по объему, стальная стружка – 5-40 % по объему. При этом обозначены свойства бетэла: удельное электрическое сопротивление 1-40 Ом\*см, предел прочности при сжатии –30 Мпа, плотность – 1450-1850 кг/м<sup>3</sup>.

В статье [14] описан токопроводящий бетон с удельным электрическим сопротивлением 45-55 Ом\*см полученный за счет введения фибры из углерода в количестве 2 % по массе минерального вяжущего. Получен бетэл со стабильными свойствами, однако, принимая во внимание стоимость углеродной фибры, массовое применение такой технологии ограничено ввиду отсутствия финансовой целесообразности.

В источниках [15-16] представлена информация, что наилучшими параметрами фибры являются длина 3-15 мм и диаметр не более пары микрон. Эффективно применение

углеродных нанотрубок для повышения проводимости, однако массовое применение неэффективно с точки зрения экономики.

В СССР и РФ развитие получили исследования в области бетэла с использованием дисперсного токопроводящего компонента. Значительная часть статей [17-21] посвящена влиянию таких параметров технического углерода, а именно: структурности и удельной поверхности на эффект снижения удельного электрического сопротивления. Вместе с тем, влияние процесса гидратации портландцемента на формирование электрической проводимости изучено недостаточно.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В работе применены следующие материалы:

- портландцемент без добавок Цем1 42,5 Д0 производства ООО «Холсим (РУС) СМ» по с ГОСТ 31108-2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»;
- технический углерод марки К-354 по ГОСТ 7885-86 «Углерод технический для производства резины. Технические условия»;
- суперпластификатор Sika в сухом порошкообразном виде;
- вода в соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

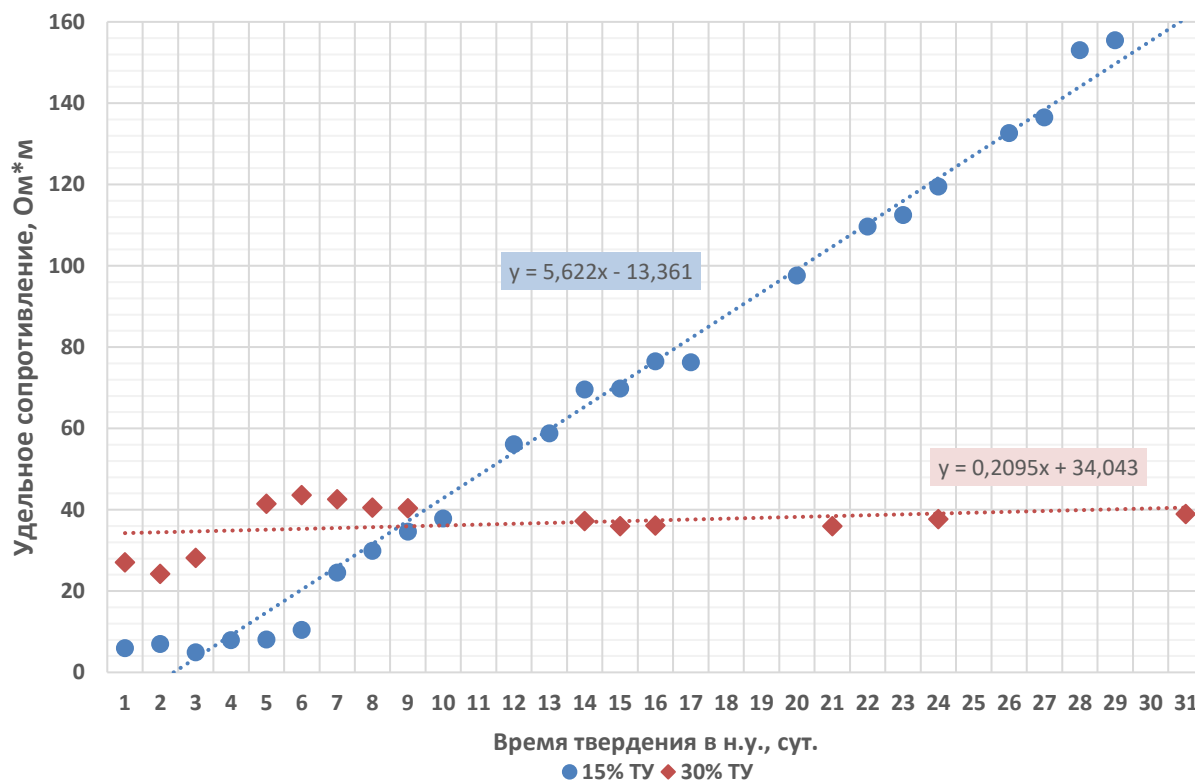
Реологические свойства определялись по расплыву формы-конуса в соответствии с ГОСТ 310.4-81. Образцы изготавливались на тесте с расплывом формы-конуса 200мм при одинаковом количестве воды затворения, равном 0,5 от массы композиционного вяжущего. Равная подвижность обеспечивалась подбором соответствующей дозировки добавки.

Измерение значений абсолютного электрического сопротивления производилось цифровым мультиметром RGK DM-30 776448, внесенным в госреестр измерительного оборудования (Госреестр № 81409-21).

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

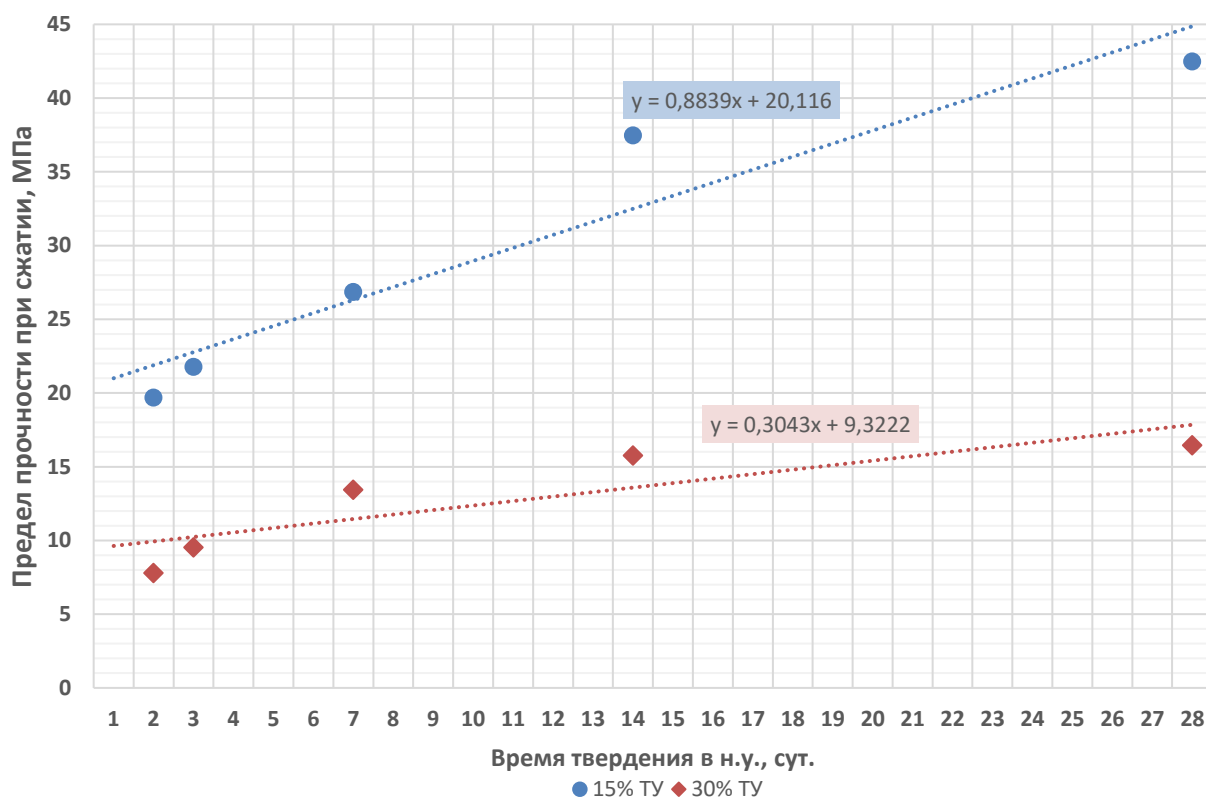
Из равноподвижной массы композиционного вяжущего, приготовлены образцы для измерения электрического проводимости согласно методике, уточненной в предыдущем разделе, а также образцы-балочки размером 16x4x4 см. для определения прочности. Основным отличием двух составов является количество токопроводящего компонента, 15% и 30% для по массе. При этом, значительная водопотребность технического углерода потребовала увеличения количества суперпластификатора 2 раза более чем в составе №2 для получения смкси с одинаковой подвижностью.

После гидратации в течении 1 суток образцы помещались в нормальные условия. Изменения проводимости приведены рис. 1. Состав с 15% токопроводящего компонента на 7-е сутки нормального твердения имел удельное электрическое сопротивление 24,6 Ом\*м, на 28-е – 153,1 Ом\*м. Для состава с 30% технического углерода эти параметры составили 42,6 Ом\*м и 38 Ом\*м соответственно.



**Рис. 1.** Рост электрического сопротивления образцов

Значение коэффициента при гидратации составило 5,62 для состава с 15% технического углерода и 0,21 для состава с 30% технического углерода. Сопротивление образца с 30% технического углерода в 1-10 сутки твердения превышало значение сопротивления для образца с 15% технического углерода. Результаты могут говорить о наличии большего количества ионов растворимых минералов портландцементного клинкера, а также более значительным изменением их содержания для состава с меньшим количеством токопроводящего компонента. Увеличение удельного электрического сопротивления вызвано твердением портландцемента (рисунок 2).



**Рис. 2.** Динамика набора прочности

Прочность состава с 15% углерода - 26,8 МПа на 7 сутки, 42,5 МПа на 28 сутки. Состав с 30% технического углерода на 7 сутки - 13,5 МПа, на 28 сутки – 16,5 МПа.

## ВЫВОДЫ

Получены составы вяжущего с пониженным электрическим сопротивлением на основе цемента, тонкодисперсного углерода в количестве 15 и 30%, а также порошкообразного суперпластификатора. Введение технического углерода в сочетании с повышенным количеством пластификатора позволяет получить искусственный каменный материал на основе портландцемента, обладающий пониженным электрическим сопротивлением.

Показано влияние гидратации материала в нормальных условиях на величину удельного электрического сопротивления. Для бетэла с 15% технического углерода, удельное электрическое сопротивление было меньше в возрасте 1-10 суток твердения чем для состава с 30% технического углерода, что может быть объяснено большим количеством ионов растворимых компонентов портландцемента, ввиду большего количества вяжущего в составе. Вместе с тем, в дальнейшем образец с 30% технического углерода не претерпел увеличения сопротивления, в то время как образец с 15% технического углерода увеличил сопротивление более чем в 3 раза.

Анализ динамики набора прочности образцов показал существенный прирост прочности для образцов состава с 15% технического углерода, что вполне закономерно, за счет большего количества вяжущего, меньшего количества пластификатора. Прирост прочности с 7 по 14 сутки у образцов состава с 30% технического углерода был на уровне погрешности.

На основании полученных данных можно сделать выводы о влиянии процесса гидратации на изменение удельного электрического сопротивления токопроводящего камня, что может быть снижением количества воды в образцах и, как следствие, ионов растворимых веществ. Вместе с тем, дополнительного изучения требует вопрос влияния изменений структуры цементного камня в процессе твердения расположение частиц токопроводящего компонента, образующего электропроводные цепочки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Федюк Р.С., Кузьмин Д.Е., Батаршин В.О., и др. Электропроводящие бетоны для специальных сооружений // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2017. – № 1. – С. 51–57.
2. Терехин И.А., Кремлев И.А., Кондратьев Ю.В. и др. Модельное представление сухого бетона железобетонного фундамента контактной сети, как электрического проводника // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 88–92.
3. Титова Т.С., Сацук Т.П., Терехин И.А., Тарабин И.В. Оценка условий электробезопасности при применении опор контактной сети в качестве естественных заземлителей // Электротехника. – 2021. – № 2. – С. 7–11.
4. Агунов А.В., Терёхин И.А., Баранов И.А. Анализ применения электропроводящих бетонов в электроэнергетике // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – № 2. – С. 5–15.
5. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва : Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
6. Урханова, Л. А., Буянтуев С. Л., Урханова А. А., Лхасаранов С. А., Ардашова Г. Р., Федюк Р. С., Свинцов А. П., Иванов И. А. Механические и электрические свойства бетона, модифицированного углеродными наночастицами // Инженерно-строительный журнал. 2019. №8 (92). с. 163–172. DOI: 10.18720/MCE. 92.1
7. Рекомендации по приготовлению электропроводящего раствора: утв. Госстрой СССР Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт бетона и железобетона (НИИЖБ) 10.01.1983-Москва.1983.-9с.
8. Gao D., Sturm M., Mo Y.L., *Electrical resistance of carbon-nanofiber concrete // Smart material construction, № 20, pp. 101-112, 2011*
9. Wu J., Liu J., Yang F., Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. // Construction building materials, № 75. pp. 129-135, 2015.
10. Грешкина, Е. В., Табагуа Г. Р., Тамов М. М. Электрическая проводимость и пьезорезистивные свойства цементного камня с добавлением углеродных нанотрубок // ИВД. 2019. № 6
11. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Саморегулируемый электронагреватель на основе эластомера, модифицированный многослойными углеродными нанотрубками // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 341–345.
12. Ilhwan Y., Doo-Yeol Y., Soonho K., Electrical and self-sensing properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete with carbon nanotubes. // Transportation Research Record, vol. 2551, № 1 pp. 10-27, 2016.
13. Venkatraman K., Tamizharasan V., Electrically conductive concrete. // Construction and building materials, № 4, pp. 136-147, 2015.
14. Galao O., Banon L., Carmona J., Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing. // Construction and building materials, № 52. pp. 137-145, 2016
15. Gomis J., Galao O., Gomis V., Zornoza P., Self-heating and deicing conductive cement. // Construction building materials, № 75. pp. 442-449, 2015.
16. Yu X., Kwon E., Carbon Nanotube Based Self-sensing Concrete for Pavement Structural Health Monitoring, // Cement and concrete composites, № 54. pp. 110-116, 2014
17. Sircar A. K. Effect of carbon-black particle-size distribution on electrical-conductivity / A. K. Sircar, T. G. Lamond // Rubber Chem. Technol. 1978. Vol. 51. P. 126.
18. Voet A. Investigation of carbon chains in rubber vulcanizates by means of dynamic electrical conductivity / A. Voet, F. R. Cook // Rubber Chem. Technol. 1968. Vol. 41. P. 1207.
19. Boonstra B. Performance of Carbon Blacks - Influence of Surface Roughness and Porosity / B. B. Boonstra, E. M. Dannenberg // Industrial and Engineering Chemistry. 1955. Vol. 47. P. 339.
20. Medalia A. I. Electrical conduction in carbon black composites / A. I. Medalia // Rubber Chemical Technology. 1986. Vol. 59. P. 432.
21. Verhelst W. F. The role of morphology and structure of carbon blacks in the electrical conductance of vulcanizates / W.F. Verhelst [et al.] // Rubber Chemical Technology. 1977. V. 50. P. 735.



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ВЫБОРЕ ОКОН ПВХ

**К.В. Кочетов<sup>1</sup>, А.Д. Попов<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 392000,  
г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5,

<sup>1</sup>*kirill.morchansk@gmail.com*

<sup>2</sup>*nbhfnjht@mail.ru*

Оконные изделия – это светопрозрачные изделия, включающие в себя раму и стеклопакет, и используемые для заполнения световых проемов.

Рама окна, как правило, включает в себя пластиковый профиль состоит из пластикового профиля и металлическое армирование, находящееся внутри. Благодаря такому составу данный вид изделий называют металлопластиковыми.

Выбору конструкции и типа заполнения светового проема необходимо уделить особое внимание еще на этапе проектирования (до строительства) объекта, так как тепловые потери, приходящиеся на окна зданий, как правило, составляют до 40 % от общих тепловых потерь.

Благодаря пластиковому профилю стеклопакет имеет повышенное приведённое термическое сопротивление теплопередаче, а также эстетический вид, а присутствие армирования делает окно прочным и устойчивым к температурным перепадам и деформациям.

Стоит заметить, что изначально полимер без примесей имеет плохую термостабильность, чтобы улучшить данную характеристику, в полимер подмешивают специальные стабилизаторы (органические и неорганические).

К дорогостоящим относятся технологии с добавлением соединений кальция и цинка, тогда как традиционная технология с добавлением соединений свинца более дешева.

Проанализировав опыт покупателей и их отзывы, делаем вывод о том, что если стоимость окна не является приоритетной характеристикой, то выбирать профили ПВХ стоит их тех, что стабилизированы кальцием или цинком, так как они обладают безупречными эксплуатационными характеристиками и стойкостью к воздействиям атмосферы.

Также такие профили не имеют проблем в процессе утилизации, которые в свою очередь возникают у профилей, стабилизированных свинцом.

В процессе вторичной переработки их можно смешивать с составами других рецептур.

Ниже приведена сравнительная таблица технических характеристик получаемого материала ПВХ с различной стабилизацией.

Таблица 1. Технические характеристики получаемого ПВХ [1]

Характеристика (наименование)	Единица измерения	Стабилизация свинец	Стабилизация кальций-цинк
Объёмный вес (плотность)	кг/м <sup>3</sup>	1500	1460
Модуль упругости	Н/мм <sup>2</sup>	2,98	2,46
Предел прочности при растяжении	Н/мм <sup>2</sup>	43	41
Предел текучести	МПа	170	147
Относительное удлинение при разрыве	%	101	94
Коэффициент температурного расширения	1/°С	80x10 <sup>-6</sup>	80x10 <sup>-6</sup>
Температура размягчения	°С	82,5	79,5

На основании изложенного можно выделить следующие достоинства ПВХ для изготовления оконных профилей:

- относительно низкая стоимость исходного сырья;
- высокое приведенное сопротивление теплопередаче и звукоизоляционные свойства;
- стойкость к влиянию атмосферных явлений;
- возможность нанесения декоративного покрытия;
- экологическая безопасность;
- возможность вторичной переработки;
- срок службы составляет до 50 лет.

В тоже время, ПВХ профили имеют и недостатки.

1. Низкий модуль упругости.

Среди применяемых в строительстве материалов модуль упругости у ПВХ самый низкий  $E = 2,47-2,98$  Н/мм<sup>2</sup>, тогда как у дерева поперёк волокон он равен  $E = 50$  Н/мм<sup>2</sup>, а у алюминиевых сплавов  $E = 71$  Н/мм<sup>2</sup>. Поэтому для повышения прочностных параметров ПВХ профилей и применяют металлическое армирование.

2. Зависимость механических свойств от температуры. При понижении температуры модуль упругости ПВХ повышается, но при этом увеличивается его хрупкость. Монтаж окон из ПВХ в зимнее время при температуре ниже -10 -15 °С нежелателен, так как велик риск разрушения ПВХ при механическом воздействии.

С повышением температуры ПВХ постепенно размягчается и при температуре выше +40 °С начинается резкое падение его прочностных характеристик.

3. Высокий коэффициент линейного расширения. ПВХ имеет коэффициент температурного расширения  $\alpha = 80 \cdot 10^{-6}$  1/°С гораздо больший, чем у применяемых смежных строительных материалов таких, как бетон ( $10 \cdot 10^{-6}$  1/°С) и стекло ( $8,5 \cdot 10^{-6}$  1/°С).

4. Избирательность к чистящим средствам. При выборе подходящих чистящих средств нужно избегать средства с содержанием растворителей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борискина И.В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий. Учебное пособие. И.В. Борискина, А.А. Плотников; Под ред. И.В. Борискиной; – Москва, Издательство АСВ 2003. – 320 с.; 29 см. – Библиогр.: с. 319. – 24000 экз. – ISBN 5-93093-085-6. – Текст : непосредственный.
2. Пластиковые окна : стеклопакеты, окна ПВХ : сайт. – Москва, 2021 – . URL: <https://www.forec.ru/okna.htm> (дата обращения: 01.11.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
3. Матросов Ю.А. Нормативная база энергосбережения в зданиях на федеральном и региональном уровнях

- / Ю.А. Матросов // Теплоэнергоэффективные технологии. Информационный бюллетень. – 2003. – № 4. – С.28-33.
4. Алоян Р.М. Интегральный показатель энергоэффективности как основа организационного механизма строительства и эксплуатации энергоэффективных зданий / Р.М. Алоян, А.Б. Петрухин, Л.А. Опарина, М.В. Ставрова // Жилищное строительство. – 2012. – № 3. – С. 46-48.
  5. Алоян Р.М. Применение принципов системотехники строительства к обеспечению энергоэффективности зданий / Р.М. Алоян, Л.А. Опарина, Н.И. Варамашвили // Актуальные вопросы строительства: материалы десятой Междунар. науч.-техн. конфер. – Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2011. – С. 292-295.
  6. Алоян Р.М. Формирование системотехнических принципов энергоэффективности зданий / Р.М. Алоян, Л.А. Опарина, Н.И. Варамашвили // Вестник МГСУ. – 2012. – № 8. – С. 147-153.
  7. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон Рос. Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 11 ноября 2009 г. // Рос. газ. – 2009. – 27 нояб. (№ 5050).

## АРБОЛИТ ИЗ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ КАРАКАЛПАКСТАНА

М.О. Асаматдинов<sup>1</sup>, Н.З. Агафонова<sup>2</sup>, А.М. Матьякубов<sup>1</sup>, Р.К. Барлыков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Каракалпакский государственный университет им. Бердаха,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

### Аннотация

В технологии строительных материалов изначально заложен принцип возможной утилизации отходов других производств. Для регионов с развитым сельским хозяйством и промышленной переработкой сельхоз продукции традиционно является важным использование отходов такой переработки.

Цель исследований изучение возможности применения сельскохозяйственных отходов Каракалпакстана в качестве компонентов строительных материалов. Основной задачей исследований было исследование возможности применения отходов обработки корня лакрицы в качестве органического компонента арболита.

Определен химический состав лакрицы: целлюлоза 46,7%; лигнин 25,2%; пентозан 24,4%; водорастворимые вещества 3,7% и оценено влияние каждого компонента на свойства органического заполнителя арболита. Нейтрализация сахарозы, являющейся компонентом, снижающим активность портландцемента, осуществлялась добавлением хлорида бария  $BaCl_2$

Подтверждена целесообразность принудительного прессования полуфабриката в процессе формования образцов арболита. Экспериментально подтверждено оптимальное соотношение древесины лакрицы и модифицированного мелкозернистого бетона, которое составляет 250–260 кг обработанного корня лакрицы к 370–390 смеси модифицированного вяжущего, содержащего в том числе портландцемент в количестве 180–190 кг. По результатам испытаний на прочность арболита из корня лакрицы с добавкой суперпластификатора С-3 прочность повышается до 7,3 МПа.

### ВВЕДЕНИЕ

Строительство и строительная наука являются весьма инерционными областями инженерной практики и знания. При этом есть характерные тенденции, которые реализуются в строительном комплексе постоянно и во все возрастающих объемах. Во-первых, это стремление к снижению массы несущих конструкций и в первую очередь, стен. Во-вторых, это повышение тепловой эффективности ограждающих конструкций с целью формирования комфортных условий в помещениях. В-третьих, это обоснованное использование отходов других производств. В этом отношении развитие технологий материалов группы арболита перспективно. Особенно эффективно применение изделий из арболита в сельской местности и при условии использования сельскохозяйственных целлюлозосодержащих отходов. Подобные отходы используются ограниченно, основной способ их утилизации, это использование в качестве твердого топлива.

Арболит (ГОСТ 19222-2019) это большая группа цементосодержащих материалов, относящаяся к группе легких теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных бетонов-конгломератов с композитной, волокнистой структурой. В строительстве используются различные виды арболита под разными названиями: «Велокс» (Австрия), «Дюрипанель» (Германия), «Пилинобетон» (Чехия и Словакия), «Дюризол» (Швейцарии). Основные области применения – это стеновые блоки или панели, теплоизоляционные элементы, а также оставляемая (несъемная) опалубка. [1, 2].

Основными компонентами арболита являются частицы органического заполнителя растительного происхождения и минеральное вяжущее вещество. В основном в качестве вяжущего используют портландцемент, так же есть решения с применением магнезиального вяжущего, ангидрита, а также модифицированного гипсового вяжущего.

существую рецептуры арболита с поризованной минеральной матрицей. В это случае в вяжущее вводят специальные воздуховолекающие добавки, а в результате получают изделия, относящиеся к группе теплоизоляционных.

Частицы органического заполнителя как правило являются вторичными продуктами производства деловой древесины или столярных изделий и содержат вещества отрицательно влияющие на химические реакции гидратации компонентов цементного клинкера. для повышения пригодности органических компонентов их обрабатывают растворами различных химических добавок, в том числе и снижающих возможность загнивания древесины в изделии или образования грибка.

Применять вторичную древесину после длительного хранения на воздухе не рекомендуется, так как существует опасность образования гнили. Далее древесный компонент перемешивают с минеральным компонентом; получающийся при этом цементное тесто обволакивает поверхности частиц и проникает в их неровности, трещины и поры, а после отвердевания омоноличивает органические волокна.

В странах европейской части СНГ (Россия, Беларусь, Украина) в качестве органического заполнителя при производстве арболита в основном используются отходы древесины, которыми богаты эти страны. В странах Центрально-Азиатского региона, где ресурсы древесины ограничены, при производстве арболита в качестве органического заполнителя используются отходы местного сельского хозяйства и растениеводства. Известны рецептуры арболита с использованием стеблей хлопчатника, рисовой лузги, тростника и камыша, костры конопли и льна, пшеничной и рисовой соломы [3, 4].

В основном используют относительно мягкие и упруго-пластичные волокнистые органические материалы, но существуют составы арболита на основе обработанной кожуры грецкого ореха и пр. (таблица 1).

По средней плотности в сухом состоянии, арболит подразделяют на конструктивно-теплоизоляционный (средней плотностью не менее 500 кг/м<sup>3</sup>) и теплоизоляционный (средней плотностью не более 500 кг/м<sup>3</sup>). В зависимости от средней плотности, вида органического компонента и вида вяжущего арболит подразделяется на классы по прочности от В5 до В30. Морозостойкость теплоизоляционно-конструкционного арболита должна быть не менее F35. В том случае, если предусматривается внешняя защита (штукатурка, облицовка) допускается марка по морозостойкости F25.

Таблица 1. Свойства арболита на основе древесины и сельскохозяйственных отходов

Вид арболита	Класс по прочност и при сжатии	Средняя плотность арболита кг/м <sup>3</sup>				
		Измельчен ная древесина	Хлопчатн ик	Костра конопли	Рисовая солома	Кожура грецкого ореха
Теплоизоля ционный	В0,35	400-500	400-450	400-450	500	450-500
	В0,75	450-500	450-500	450-500	-	-
	В1	500	500	500	-	-
Конструкц ионно- теплоизоля ционный	В1,5	500-650	550-650	550-650	600-700	500-650
	В2,0	500-700	600-700	600-700	-	500-700
	В2,5	600-750	700-800	-	-	-
	В3,5	700-850	-	-	-	-

Развитие аграрной отрасли в республике Каракалпакстан предполагает накопление сельскохозяйственных отходов: шелухи хлопчатника, риса и других культур, а также отходов обработки лакрицы. Лакрица (солодка) как пищевой и фармацевтический полуфабрикат востребована во многих странах. На территории Каракалпакстана существует 15 предприятий по переработке корня лакрицы (рис. 1). Учитывая то, что из 13 т корней

лакрицы получают выход продукта в 3 т, а следовательно, 10 т отхода в одном цикле, то можно сделать вывод о масштабах проблемы по утилизации таких отходов.



**Рис. 1.** Совместное Узбекско-Китайское предприятие по переработке лакрицы

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Заполнители оказывают существенное влияние на технологические и эксплуатационные свойства, а также на процессы структурообразования растительно-вяжущих композитов. Как уже отмечалось, древесина содержит вещества, замедляющие процессы гидролиза, гидратации клинкерных минералов портландцемента, поэтому в цементный арболит вводят добавки, такие как хлорид кальция, жидкое стекло, серноокислый глинозем с гидратной известью. Существуют и более радикальные методы обработки древесных волокон, например фтор- и борсодержащими синтетическими соединениями [5, 6].

Минеральная матрица материала формируется на основе мелкого заполнителя (наполнителя) и вяжущих различных типов: портландцемента, гипсового и глиногипсового, шлакощелочного вяжущее и др. Возможно использование в составе вяжущего вторичного переработанного бетона или отходов цементного производства [7, 8]. Теплоизоляционный арболит выпускают с дополнительной поризацией минеральной матрицы.

В соответствии с ГОСТ 19222-2019 регламентируется содержание измельченного органического компонента по фракциям. Расход минерального вяжущего и органического компонента изменяется в интервалах соответственно 250–400 кг/м<sup>3</sup> и 150–300 кг/м<sup>3</sup>. Прочность арболита зависит от свойств измельченного органического компонента: качества, вида, химического и гранулометрического состава, а также коэффициента формы зерен, деформативностью. А также свойствами вяжущего, вида и расхода мелкого заполнителя и использование (или нет) поризации минеральной матрицы. Бетонную смесь приготавливают в смесителях принудительного действия. Формование осуществляется беспрессовым способом (при поризации матрицы, например) или прессовыми методами: прессованием, экструзией и др.

На кафедре "Городское строительство и хозяйство" КГУ им. Бердаха и на кафедре Строительного материаловедения НИУ МГСУ начали проводить эксперименты по исследованию возможности применения сельскохозяйственных отходов Каракалпакстана в качестве компонентов строительных материалов. В частности, с применением отходов обработки лакрицы изучается возможность получения арболита для его применения в качестве "несъемной опалубки" или арболитовых блоков для стен сельских сооружений.

Основной задачей исследований, изложенных в статье, было изучение возможности применения отходов обработки корня лакрицы (рис. 2, таблица 2) в качестве органического компонента арболита. Насыпная плотность лакрицы фракции 0-5 мм — 232 кг/м<sup>3</sup>; фракции 5-10 мм — 205 кг/м<sup>3</sup>; фракции 10-20 мм — 201 кг/м<sup>3</sup>.



**Рис. 2.** Корень лакрицы, фракции: а – 0-5мм; б – 5-10 мм; в – 10-20 мм

Химический состав лакрицы: целлюлоза 46,7%; лигнин 25,2%; пентозан 24,4%; водорастворимые вещества 3,7%. Каждый из компонентов лакрицы как химического вещества ответственен за свойства волокна и его способность подвергаться химической модификации. Целлюлоза, это белое твёрдое вещество, нерастворимое в воде. Целлюлоза, это главная составная часть клеточных оболочек всех высших растений. Молекулы целлюлозы — неразветвлённые цепочки из остатков  $\beta$ -глюкозы, соединённых гликозидными связями. Из пентозанов наиболее распространены и более изучены ксиланы, дающие при гидролизе в качестве основного моносахарида Л-ксилозу. Цепи пентозанов значительно короче, чем цепи целлюлозы. Лигнин — вещество, характеризующее одревесневшие стенки растительных клеток.

Продуктом разложения целлюлозы и пентозы является сахароза, вещество способное «отравить» портландцемент и нейтрализация которой необходима. Экспериментальные работы по нейтрализации сахарозы в составе органического заполнителя проводились добавлением хлорида бария  $BaCl_2$ . Установлено, что добавка до 1,0% хлорид бария не только нейтрализует сахарозу в составе органического компонента, но и способствует увеличению прочности при сжатии арболитовых образцов на 18–20%. Содержание хлорида бария более 1,0%, по-видимому, приводит к размягчению материала корня солодки (лакрицы), закрывая микропоры, тем самым затрудняя проникновение в них активированного вяжущего.

Для арболита с применением отходов обработки корня лакрицы использовали в качестве вяжущего портландцемент (ГОСТ 31108-2020) типа ТИТАН СЕМЕНТ цем II /А - И 32,5 Н, имеющий следующие характеристики: начало схватывания - 4 ч 35 мин; конец схватывания 8 ч 5 мин; насыпная плотность - 1,082 гр/см<sup>3</sup>; прочность портландцемента при 28 суточном твердении изгиб 10,2 МПа, на сжатие 28,3 МПа. В качестве добавок использовали Cem Plast; Poly Plast и суперпластификатор С-3.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Арболитовую смесь на основе корня лакрицы, модифицированного вяжущего на основе портландцемента и мелкого заполнителя готовили путем перемешивания в течение 10 минут. Смесь укладывали в формы кубы размером 100×100×100 мм в два слоя высотой по 50 мм. Каждый слой уплотняли и уплотняли путем трамбования (рис. 3а). Образцы твердели при нормальных условиях (рис. 3б). Определяли среднюю плотность арболита и его прочность на сжатие. Результаты испытаний представлены в таблице 3. Также проводилось экспериментальные исследования по изучению адгезионной прочности арболита к мелкозернистому бетону и минеральной штукатурке по ГОСТ 57984-2017.



**Рис. 3.** Образцы арболита: а – после формования; б – после твердения

Таблица 2. Прочность арболита из корней лакрицы 28-ми суточная прочность из кубов 10х10х10х см.

Вид добавки суперпластификатора	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа
Без добавок	866	1,91
Cem Plast	880	4,9
Poly Plast	870	2,9
С - 3	923	7.3

По результатам испытаний на прочность (таблица 2) образцов арболита из корня лакрицы с добавкой суперпластификатора С-3 прочность повышается с 1,91 МПа до 7,3 МПа. Расход добавки С3 0,3% от расхода воды.

В ходе экспериментов по изготовлению арболита выявилась очень серьезная проблема, решение которой нашли с большим трудом. Дело в том, что при перемешивании древесной щепы, цемента и водного раствора с минерализаторами происходил процесс набухания щепы, т.е. ее увеличение в размерах. Эта особенность арболита затрудняла совмещение разноскоростных процессов, ведь скорость набухания щепы была очень медленной и длилась до 12 часов, а схватывание цементного камня происходило намного быстрее, в течение нескольких часов. Все это приводило к тому, что после изготовления арболита щепка продолжала увеличиваться в объеме (разбухать), частично разрывая еще не застывший цементный камень, что приводило к снижению прочности материала.

Установлено, что предел адгезионной прочности с увеличением срока твердения повышается и достигает до 0,28 МПа. По-видимому, это объясняется тем, что по мере твердения происходит испарение влаги из волокон лакрицы и проникновение в микропоры волокон вяжущего вещества. В работе также определены теплопроводность, водопоглощение и морозостойкость арболита по стандартной методике согласно ГОСТ 30256, ГОСТ 8269, 9758 и ГОСТ 10060.3. Нами установлены, что изучаемые образцы отвечают требованиям ГОСТ 19222-2019: теплопроводность 0,15–0,20 Вт/(м°С); водопоглощение 41% и морозостойкость не менее 35 циклов.

## **ВЫВОДЫ**

В результате экспериментальных исследований сформированы основы технологии арболита на основе модифицированных отходов производства лакрицы (используемой в фармацевтике). Определен химический состав лакрицы, состоящей из целлюлозы 46,7%; лигнина 25,2%; пентозана 24,4%. Для нейтрализации сахарозы, являющейся компонентом



лакричного корня и снижающей активность портландцемента, рекомендуется применение хлорида бария  $BaCl_2$  в количестве 0,08–0,10 %.

Подтверждена целесообразность принудительного прессования полуфабриката в процессе формирования арболита. Экспериментально подтверждено оптимальное соотношение древесины лакричного корня и модифицированного мелкозернистого бетона, которое составляет 250–260 кг обработанного корня лакрицы к 370–390 смеси модифицированного вяжущего, содержащего в том числе портландцемент в количестве 180–190 кг. По результатам испытаний на прочность арболита из корня лакрицы с добавкой суперпластификатора С-3 прочность повышается до 7,3 МПа. Предел адгезионной прочности составляет 0,28 МПа; теплопроводность арболита составляет 0,15–0,20 Вт/(м<sup>°С</sup>); водопоглощение 41%; морозостойкость 35 циклов.

Полученный арболит (мелкозернистый бетон на основе модифицированного портландцемента, мелкого минерального заполнителя и органического заполнителя) может использоваться для изготовления стеновых блоков или как несъемная опалубка при монолитном строительстве. Реализация разработанной технологии вместе с решением вопроса экономии ресурсов также будет способствовать улучшению экологической ситуации в регионе за счет снижения отходов производства лакрицы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акулова М.В., Исакулов Б.Р., Джумабаев М.Д., Толеуов Т.Ж. Получение легкого арболитобетона на основе цементно-золашламового вяжущего и органического заполнителя из скорлупы грецкого ореха // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №4 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/07TVN416.pdf>.
2. А.С. Жив, С. Галебуй, Б.Р. Исакулов. Ресурсосберегающие технологии получения арболита на основе отходов промышленности и местных сырьевых ресурсов Азии и Африки. – Москва: Механизация строительства №3 (825), 2013. – с. 14.
3. Исакулов Б.Р. Исследование золошламовых вяжущих на основе отходов топливно-энергетического комплекса Казахстана / Б.Р. Исакулов, А.С. Жив // Научный вестник ВГАСУ. - Воронеж, 2012. №3 (27). – с. 66-74.
4. Aleksey Zhukov, Irina Stepina and Sofia Bazhenova. Ensuring the Durability of Buildings through the Use of Insulation Systems Based on Polyethylene Foam. Buildings 2022, 12(11), 1937; <https://doi.org/10.3390/buildings12111937> - 10 Nov 2022
5. Stepina, I. V. Change in crystalline structure of cellulose caused by wood preservation / I. V. Stepina // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 923. – P. 51-55. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.923.51
6. Velichko, E., Shokodko, E. Reactive powder concrete based on multicomponent cement systems with multilevel optimization of the disperse composition. MATEC Web of Conferences 251, 01042 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825101042>
7. Сулейменов С.Т. Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалах из минеральных отходов промышленности. - М.: Манускрипт, 1996. – с. 128, 133-138.
8. Муртазаев С.-А.Ю. Мелкозернистые бетоны на основе наполнителей из вторичного сырья: научное издание / С.-А.Ю. Муртазаев, Д.К.-С. Батаев, З.Х. Исмаилова. – М.: Комтехпринт, 2017. – 142 с.

# ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ДОПИРОВАННОГО ОКСИДА ТИТАНА НА КОРРОЗИЮ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

И.В. Козлова<sup>1</sup>, М.О. Дударева<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>*iv.kozlova@mail.ru*

<sup>2</sup>*modudareva@yandex.ru*

## Аннотация

В данной статье рассматривается проблема коррозионного разрушения цементного камня под воздействием мягких вод. Рассматривается влияние добавки на основе допированного висмутом оксида титана на физико-механические характеристики образцов цементного камня после выдерживания их в дистиллированной воде и оценивается значение водородного показателя в растворе после извлечения образцов.

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозия бетона - это процесс разрушения цементного камня под воздействием коррозионной среды. Согласно классификации В.М. Москвина, выделяют три основных вида коррозионных разрушений цементного камня: коррозия первого вида, развивающаяся при продолжительном воздействии проточных пресных вод, приводящая к ослаблению структуры за счет вымывания продуктов гидратации клинкерных минералов, особенно гидроксида кальция. Второй вид коррозии формируется при возникновении обменных химических реакций между компонентами цементного камня и агрессивной коррозионной среды, в результате которых образуются легкорастворимые продукты реакций, или вещества, не обладающие вяжущими свойствами. Третий вид коррозии развивается в результате кристаллизации в порах цементного камня растворов солей, что приводит к возникновению внутренних напряжений в структуре бетона и, в итоге, к его разрушению. Важно также отметить и разрушение цементных материалов под воздействием биологических факторов, вызванных разрастанием колоний бактерий и микроскопических грибов [1-5]. Защита изделий из цементного камня от различных коррозионных разрушений может осуществляться уже на этапе формирования его структуры за счет введения в состав цементной композиции добавок, способных повысить плотность и уменьшить пористость цементного камня, химически связать наиболее растворимые компоненты цементного камня в малорастворимые соединения, или осуществляется за счет введения биоцидных добавок [6, 7]. Эффективны также вторичные методы защиты, осуществляемые путем обработки поверхности разнообразными гидрофобизирующими составами [8], способными создать на поверхности изделия защитного слоя, препятствующего проникновению агрессивных вод через поры и капилляры в объем материала.

Одним из вариантов влияния на структуру цементного камня, как уже отмечалось, является введение ультрадисперсных добавок, способствующих увеличению плотности затвердевшего цементного камня, или к связыванию гидроксида кальция в малорастворимые низкоосновные гидросиликаты кальция. В случае использования этого варианта частицы добавки являются гидравлически неактивными, и служат центрами кристаллизации гидросиликатов кальция. Например, это углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерены, наноцеллюлоза и т.д. [9]. Также к таким компонентам цементной матрицы можно отнести допированный висмутом тонкодисперсный оксид титана, обладающий биоцидными и фотокаталитическими характеристиками, способный при комплексном подходе к структурообразованию улучшить показатели цементного камня.

Борьба с биологической коррозией цементного камня, вызванная агрессивным воздействием микроскопических плесневых грибов рассматривается в работах [10, 11, 12],

поиск новых экологичных безопасных для человека биоцидных, в частности, фунгицидных, добавок является перспективных направлений в современном строительном материаловедении. Известно, что борьба с разрастанием грибов на цементных материалах носит не только поверхностный характер: мицелий грибов способен прорасти и вглубь пористого цементного камня, вызывая внутренние напряжения и разрушения его структуры. Более плотная структура цементного камня может препятствовать процессу активного прорастания мицелия грибов внутри цементного камня, а также способствовать меньшему насыщению материала водой, тогда как влажность материала является одним из ключевых факторов для формирования биообрастания.

На основании вышеизложенного, предполагается провести исследования по влиянию добавки допированного оксида титана в модифицированных образцах на их свойства в условиях, благоприятных коррозии выщелачивания.

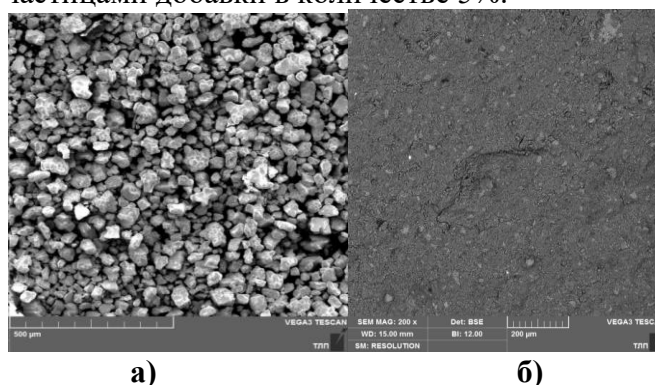
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования были выбраны образцы цементного камня, модифицированные добавкой допированного висмутом оксида титана в количестве 5%. Образцы готовились на основе цемента ЦЕМ 0 52.5Н, произведенного на Щуровском цементном заводе - Holcim.

Допированный висмутом оксида титана получали из соответствующих оксидов путем спекания с промежуточными перешихтовками. Добавка вводилась в состав цементного композита вместо воды затворения в виде стабилизированной суспензии. Гомогенизация и стабилизация суспензии проводилась на приборе УЗДН-1 при следующих параметрах ультразвуковой обработки: частоте диспергирования 44 кГц, времени диспергирования - 20 мин, температуре диспергирования  $\pm 25^{\circ}\text{C}$ .

Испытания на стойкость образцов к коррозии выщелачивания проводились в течение 3 месяцев, образцы погружали в дистиллированную воду в соответствии с ГОСТ 70109-2022 «Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний. Национальный стандарт Российской Федерации», соотношение объема дистиллированной воды в  $\text{см}^3$  к  $1 \text{ см}^2$  поверхности образцов составляло 5:1. После выдерживания в коррозионной среде в течение 1, 3, 7, 14, 21, 28 суток и 3 месяцев образцы извлекали, испытывали на прочность при сжатии на лабораторном гидравлическом прессе Controls. В растворах после извлечения образцов также измеряли значение pH.

Согласно данным сканирующей электронной микроскопии («Tescan» «Vega 3SB»), добавка представляет собой поликристаллический порошок из частиц неправильной формы, средний размер которых не превышает 50 мкм, а также конгломератов этих частиц, что является результатом спекания в процессе синтеза (рис.1а). На рис.1б представлена микрофотография образца цементного камня в возрасте 28 суток, модифицированного частицами добавки в количестве 5%.



**Рис. 1.** Микрофотографии а) частиц добавки б) образца цементного камня 28 сут (5% добавки)

Внешний вид микроструктуры поверхности затвердевшего образца позволяет сделать вывод о равномерном распределении частиц добавки в объеме цементного композита, которое достигается при помощи ультразвуковой обработки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований готовились образцы-кубики со сторонами 20x20x20 мм в аттестованных формах 6ФК-20 из бездобавочного цемента, затворенного стабилизированными водными суспензиями модифицированной добавки допированного висмутом оксида титана.

Результаты прочностных характеристик отражены в таблице 1. Из полученных данных прочности при сжатии контрольного и модифицированного образцов можно сделать вывод о том, что введение в состав цементного композита частиц оксида титана, допированного висмутом, повышает прочностные показатели образцов во всех основных сроках твердения. В первые сутки прочность увеличилась на 19 % (с 37 до 44 МПа), в марочном возрасте на 27% (с 90 до 114 МПа).

Таблица 1. Прочностные характеристики образцов цементного камня в различные сроки твердения

Образец	R <sub>сж</sub> , МПа при твердении в, сут			
	1	3	7	28
ПЦ	37	49	63	90
ПЦ+5% доб	44	57	73	114
Прирост прочности, %	19	16	16	27

Как уже было описано ранее, для исследования влияния коррозии выщелачивания образцы погружались в дистиллированную воду и выдерживались в коррозионной среде в течение 1, 3, 7, 14, 21, 28 суток и 3 месяцев. Полученные результаты изменения pH коррозионной среды представлены в таблице 2, данные прочности образцов после выдерживания в коррозионной среде представлены на рис.2.

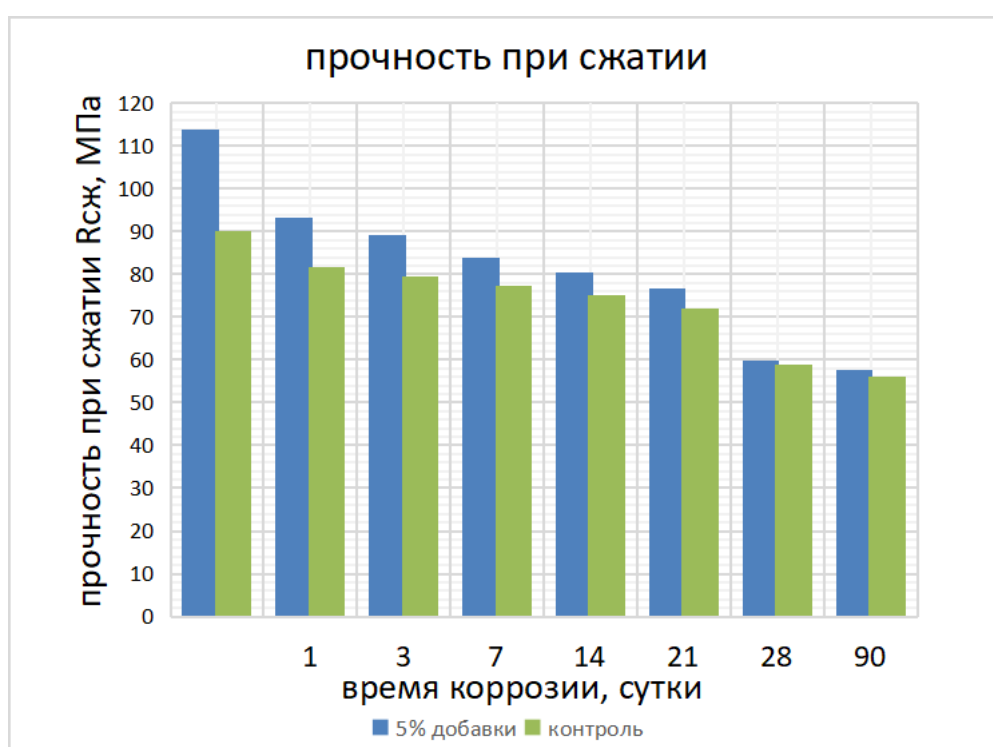
Время экспозиции в коррозионной среде, сут	pH	
	Контрольный образец	Модифицированный образец
-	13,3	13,4
1	11,7	11,5
3	11,5	10,6
7	11,3	9,0
14	8,9	8,8
28	8,8	8,8
90	8,8	8,8

По результатам значений водородного показателя водной вытяжки и по прочностным характеристикам образцов после выдерживания в коррозионных условиях можно судить, что коррозия выщелачивания наиболее интенсивно протекает в модифицированных образцах несмотря на то, что значения прочности в марочном возрасте выше, чем у контрольного образца.

Согласно [13] гидроксид кальция вымывается из цементного камня при значении pH < 12,5, следовательно, в созданных условиях в исследуемых образцах его растворения происходит уже после первых суток выдержки в дистиллированной воде. Результаты

испытаний на прочность показали в этот период выдержки снижение прочности модифицированных образцов на 17 % (с 114 до 94 МПа), контрольного образца на 9% (с 90 до 82 МПа). Уже в 3 суток выдержки происходит растворение гидроксидов кальция в модифицированных образцах ( $pH = 10,6$ ). По данным [13] растворение данного компонента цементного камня происходит при  $pH < 11,2-9,9$ . При этом прочность снизилась на 23% у модифицированных образцов по сравнению с 12% у контрольного образца. После 14 суток выдержки в коррозионных условиях значения  $pH$  у всех образцов составляет 8,8-8,9, прочность снизилась на 30 и 17%, соответственно. После 90 суток выдержки в коррозионных условиях прочность модифицированных образцов упала на 69% (с 114 до 58 МПа), у контрольного образца – на 38% (с 90 до 56 МПа).

Полученные результаты исследований показали, что скорость коррозии выщелачивания протекает наиболее интенсивно в модифицированных образцах. Это можно объяснить достаточно крупным размером введенной добавки (50 мкм) в состав цементного композита, что не позволяет достичь более плотной структуры цементного камня, несмотря на высокие значения марочной прочности модифицированных образцов.



**Рис. 2.** Прочностные характеристики образцов после выдерживания в коррозионной среде

Таким образом проведенные исследования демонстрируют, что модифицированные образцы проявляют меньшую устойчивость к коррозии выщелачивания по сравнению с контрольными, несмотря на большие значения прочности до помещения в коррозионные условия. Предполагается, что при получении добавки допированного висмутом оксида титана в более тонкодисперсном состоянии в результате золь-гель синтеза, позволит получить более плотную структуру цементного камня и позволит замедлить коррозию выщелачивания модифицированных образцов.

## ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований установлено, что введение тонкодисперсной добавки допированного висмутом оксида титана, в виде стабилизированной с помощью ультразвуковой обработки суспензии, способствует увеличению прочности цементного камня во все сроки твердения. В первые сутки прочность увеличилась на 19 % (с 37 до 44 МПа), в марочном возрасте на 27% (с 90 до 114 МПа).

Проведенные исследования коррозионного воздействия на модифицированные образцы установлено, что наблюдается наиболее интенсивная коррозия выщелачивания в модифицированных образцах: после первых суток выдержки pH среды составила 11,5, что свидетельствует о вымывании из цементного камня гидроксида кальция. При этом прочность снизилась на 17 % (со 114 до 94 МПа), после 3 суток выдержки начали растворяться гидросиликаты кальция, о чем свидетельствует значение pH среды, которое составило 10,6, прочность при этом снизилась на 23 %. После 90 суток выдержки pH составила 8,8, прочность снизилась на 69% (со 114 до 58 МПа).

Предполагается, что за счет крупного размера введенной добавки допированного висмутом оксида титана структура модифицированного цементного камня имеет недостаточно плотную структуру, что приводит к проникновению дистиллированной воды в объем материала. Для обеспечения более плотной структуры модифицированного цементного камня планируется вводить в состав цемента более тонкодисперсную добавку допированного висмутом оксида титана, полученную с помощью золь-гель синтеза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Светлов Д.А., Качалов А.Н. Микробиологическая коррозия строительных материалов // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 4. С. 18. DOI:10.15862/19SATS419.
2. Abdin Z.U., Anwar W., Khitab A. Microbiologically induced deterioration of concrete // Micro and Nano Technologies. 2022. pp. 389-403. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823970-4.00017-8>.
3. Строчкова В.В., Нелубова В.В., Рыкунова М.Д. Устойчивость вяжущих систем различного состава к действию плесневых грибов // Строительные материалы. 2020. №11. С. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-786-11-41-46>.
4. Yakovleva G., Sagadeev E., Stroganov V., Kozlova O., Okunev R., Ilinskaya O. Metabolic Activity of Micromycets Affecting Urban Concrete Constructions // Hindawi. The Scientific World Journal. 2018. Vol. 2018. 9 pp. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/8360287>.
5. Чеснокова, Т.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Изучение грибковой коррозии бетона с помощью модельной среды // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2019. № 3(59). С. 85-89.
6. Гришина А.Н. Оптимизация состава композиционного биоцидного вяжущего // Молодые учёные России : сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 35-38.
7. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Карпушин С.Н., Воронов П.В., Родин А.И., Болдина И.В. Коррозионная стойкость цементных композитов, изготовленных на основе биоцидных портландцементов с активной минеральной добавкой // Фундаментальные исследования. 2017. № 4-2.С. 247-256.
8. Павлова, И. Л., Игольников А.К. Способы защиты бетонных и железобетонных конструкций от действия агрессивных сред // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. № 1(15). С. 6-9.
9. Козлова И. В. Структурные модели и механизм влияния стабилизированных суспензий нано- и ультрадисперсных добавок на свойства цементных композиций : специальность 05.16.09 "Материаловедение (по отраслям)" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Козлова Ирина Васильевна. Москва. 2017. 22 с.
10. Strokova V.V., Le Saoutb G., Nelubova V.V., Ogurtsova Y.N. Composition and properties of cement system with glutaraldehyde // Magazine of Civil Engineering. 2021. 103(3). DOI:10.34910/MCE.103.7.
11. Klapiszewska I., Parus A., Ławniczak Ł., Jesionowski T., Klapiszewski Ł., Ślosarczyk A. Production of antibacterial cement composites containing ZnO/lignin and ZnO-SiO<sub>2</sub>/lignin hybrid admixtures // Cement and Concrete Composites. 2021. Vol. 124. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946521003188>.
12. Шарафутдинов К. Б. Исследование эффективности наномодифицированной биоцидной добавки для строительных растворов // Химия. Экология. Урбанистика. 2022. Т. 3. С. 116-119.
13. Розенталь Р.К., Степанова В.Ф., Чехний Г.В. Бетоны высокой коррозионной стойкости и нормирование их характеристик // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. №3-4. С. 14-19.

# СПОСОБНОСТЬ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ПОЛЫХ МИКРОСФЕРАХ К САМОУПЛОТНЕНИЮ

С.Д. Елихин<sup>1</sup>, А.С. Иноземцев<sup>1,2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>sergep97@mail.ru

<sup>2</sup>InozemcevAS@mgsu.ru

## Аннотация

За последние десятилетия в сфере строительства лидирующие позиции занимает монолитное возведения зданий и сооружений. Развитие строительных технологии позволили современному строительству значительно сократить трудозатраты, уменьшить материалоёмкость и снизить сроки выполнения работ. Легкие конструкционные бетоны набирают популярность на строительных площадках во всем мире. Однако, данная технология не является до конца изученной. Особый интерес вызывают реологические свойства, а также поиск способов подбора состава данных смесей, удовлетворяющих всем основным показателям качества. В качестве исследуемого материала были приняты составы из легкого конструкционного бетона на полых керамических микросферах. Испытания на определение подвижности бетонной смеси выполнены в соответствии с ГОСТ 310.4—81. Была подтверждена важность исследуемых факторов В/Ц и концентрации пластификатора на подвижности бетонной смеси, показаны их граничные значения (0,4 и 1 %, соответственно) удовлетворяющие задаче получения легких бетонов средней плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> с повышенной подвижностью. Сделан вывод о возможности достижения положительных реологических показателей для получения самоуплотняющихся бетонных смесей на полых микросферах.

## ВВЕДЕНИЕ

В современной строительной индустрии наибольшей популярностью обладает монолитное и сборно-монолитное технологии возведения зданий и сооружений. В мировом опыте продемонстрированы [1] преимущества данной технологии перед строительством из сборных конструкций, позволяющей существенно сократить сроки выполнения работ и повысить экономическую эффективность. Также важным преимуществом монолитного строительства является возможность возведения зданий и сооружений различной сложности.

Однако, несмотря на высокую эффективность, данная технология имеет определённые недостатки. Наиболее встречающейся проблемой является расслоение бетонной смеси в процессе заливки бетона в опалубку, что в дальнейшем приводит к ухудшению технических и механических характеристик конструкции. Основной причиной возникновения данного явления принято считать недостаточное или полное отсутствие уплотнения бетонной смеси путем вибрирования [2].

За последние десятилетия в сфере монолитного строительства наблюдается активное применение самоуплотняющихся бетонных смесей (СУБ) [3-5]. Данная смесь обладает высокой подвижностью, сохраняет однородность состава, плотность, а также имеет те же проектные свойства и долговечность, что и традиционный бетон [6, 7]. Технология самоуплотняющихся бетонных смесей характеризуется низким водоцементным отношением (0,38...0,40) и способностью уплотняться под собственным весом без сегрегации [8].

На сегодняшний день помимо сохранения однородности структуры бетонных конструкций и сокращения трудозатрат тенденцией монолитного строительства также принято считать [9, 10]:

- снижение веса конструкций;
- снижение теплопроводности;
- снижение материалоёмкости.

Современным решением данной задачи является использование конструкционных лёгких бетонов, обладающих высокими прочностными показателями. Однако достижение высокой подвижности бетонных смесей на лёгких заполнителях связано с существенным ограничением, связанным с возможностью расслоения таких дисперсных систем при механическом уплотнении [10, 11] из-за более низкой плотности заполнителя.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования для установления возможности получения цементных дисперсных систем на лёгких заполнителях с повышенной текучестью использовались лёгкие бетоны на полых микросферах [12, 13]. В качестве заполнителя были использованы керамические микросферы, представляющие собой полые, почти идеальной формы алюмосиликатные шарики с гладкой поверхностью диаметром 10...600 мкм, внутренняя полость частиц заполнена азотом углекислым газом (CO<sub>2</sub>). Изображение керамических микросфер под микроскопом представлен на рис. 1 [14].

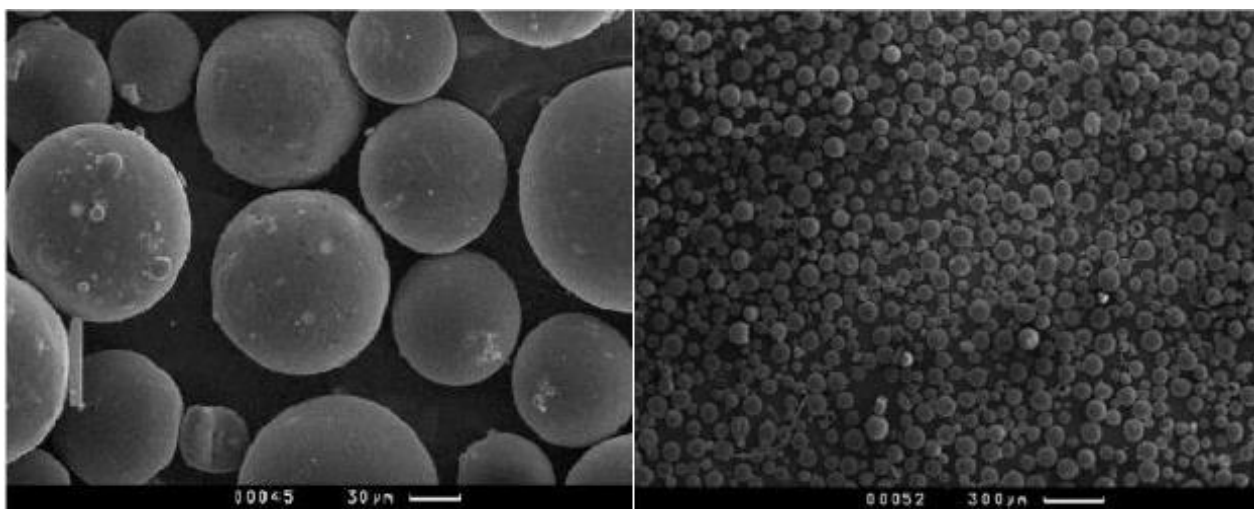


Рис. 1. Керамические микросферы под микроскопом

В качестве вяжущего вещества был принят портландцемент марки ЦЕМ I 42,5, соответствующий ГОСТ 10178—85 [15]. Также в составе минеральной части использовались: микрокремнезем, фракционный песок и кварцевая мука. Для управления подвижностью исследуемых бетонных смесей использовался гиперпластификатор Melflux 2651F.

Оценку реологических свойств лёгкого конструкционного бетона осуществляли при варьировании 2 взаимозависящих факторов (таблица 1):

- концентрация пластификатора ( $C_d$ ) в диапазоне 0,85...1,95 % от массы вяжущего;
- количество воды (В/Ц) в диапазоне 0,26...0,54.

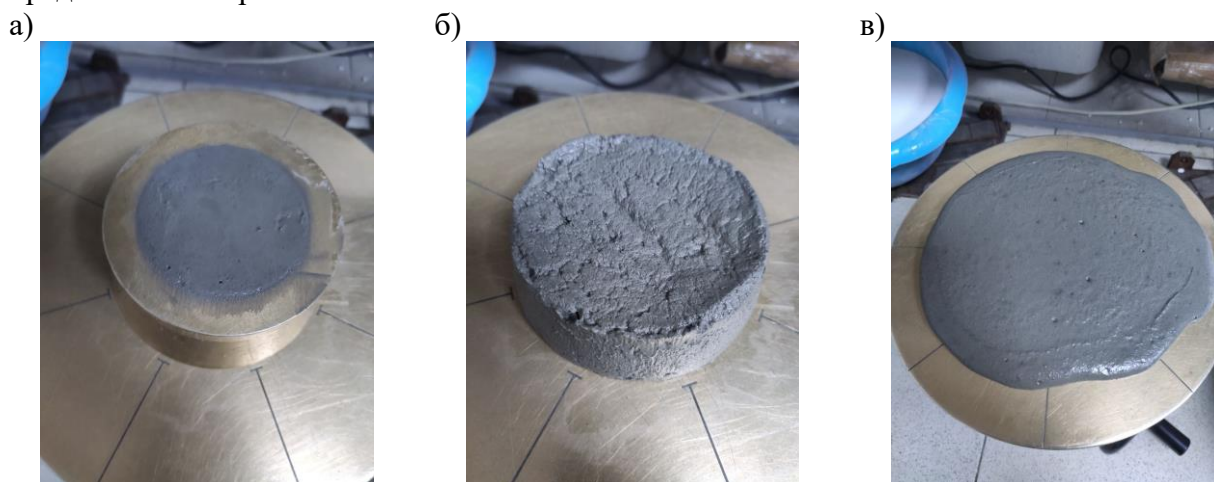
Соотношение сухих компонентов (портландцемент, микрокремнезем, мука кварцевая, песок фракционный, микросферы керамические) бетонной смеси оставалось постоянным и выбирались для достижения проектной средней плотности бетона 1400 кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1. План экспериментальных исследований

Фактор	Значение показателя / Маркировка состава									
	1/0,4	1/0,3	1/0,5	1,8/0,3	1,8/0,5	1,4/0,26	1,4/0,54	0,85/0,4	1,95/0,4	1,4/0,4
$C_d$ , %	1,00	1,00	1,00	1,80	1,80	1,40	1,40	0,85	1,95	1,40
В/Ц	0,40	0,30	0,50	0,30	0,50	0,26	0,54	0,40	0,40	0,40



Оценка подвижности бетонной смеси производилась по величине диаметра расплыва усеченного конуса размерами  $D \times d \times h$  — 101,6×69,9×50,8 мм на встряхивающем столике по ASTM C230 [16, 17]. Испытания проводились согласно п. 1.3 ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» [16, 18]. Методика определения подвижности бетонной смеси на встряхивающем столике представлена на рис.2.

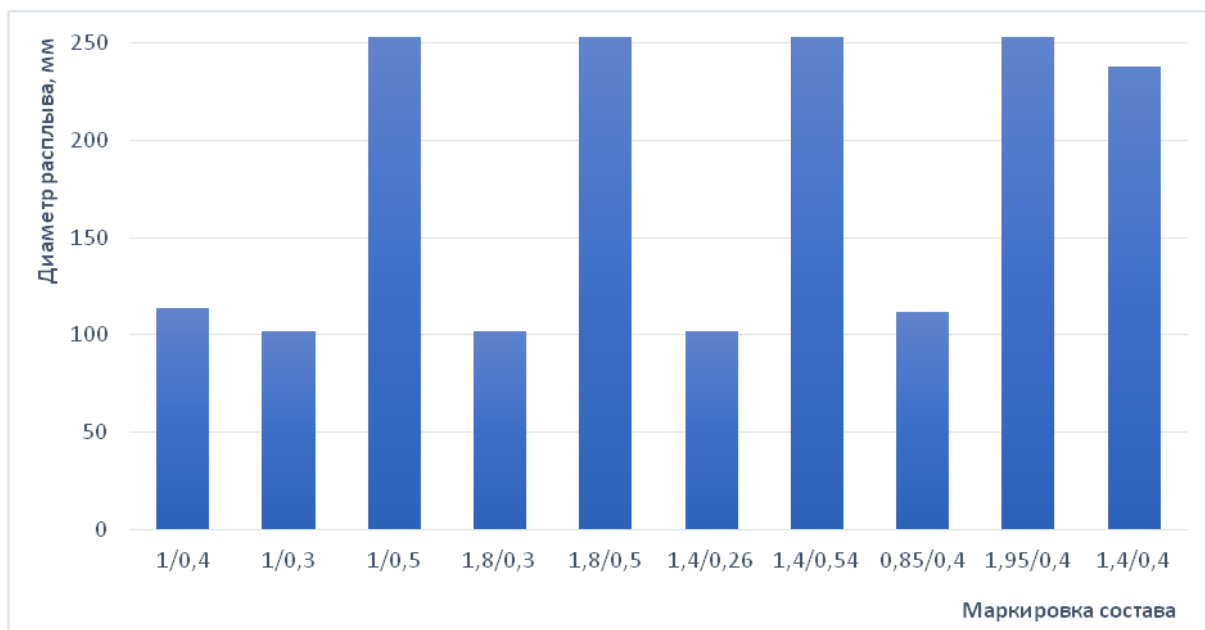


**Рис. 2.** Методика определения подвижности бетонной смеси на встряхивающем столике: а) заполнение конуса бетонной смесью; б) расплыв бетонной смеси после снятия конуса (до встряхивания); в) расплыв бетонной смеси после встряхивания

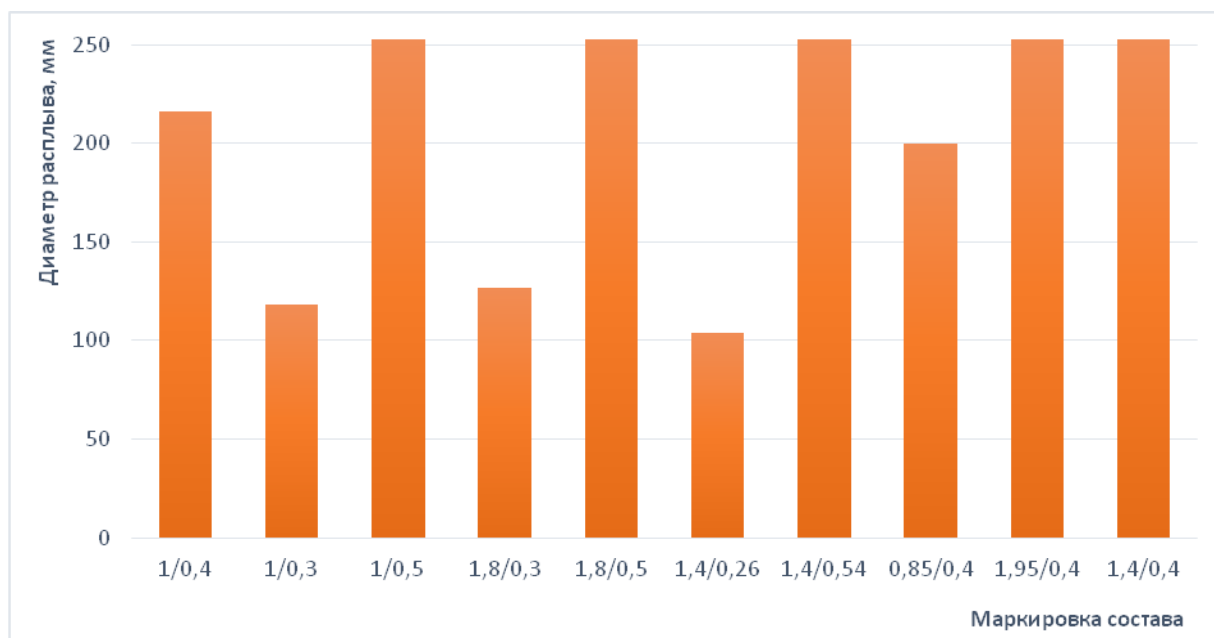
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ключевыми отличительными показателями качества самоуплотняющихся бетонных смесей являются реологические свойства и технологические особенности приготовления [16]. Управление реологическими свойствами бетона достигается за счет применения пластифицирующих добавок [16, 19]. Обеспечение высоких прочностных показателей легкого бетона достигалось благодаря оптимизированной составу цементно-минеральной части. При этом важнейшим условием для достижения поставленной задачи является наличие полых микросфер в составе, как тонкодисперсного компонента, насыщающего систему газовой фазой и снижая среднюю плотность.

В результате исследования реологических свойств установлены значения диаметров расплыва при различном значении варьируемых факторов (рис. 3, 4). При этом как на этапе изготовления, так и при определении подвижности сегрегация (расслоение) бетонной смеси легкого бетона средней плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> не наблюдалась ни для одного из составов.



**Рис. 3.** Изменение диаметра расплыва без встряхивания бетонных смесей легких бетонов



**Рис. 4.** Изменение диаметра расплыва после встряхивания бетонных смесей легких бетонов

Анализ полученных результатов показывает, что диапазоны варьирования выбранных факторов позволяют получать бетонных смеси лёгких бетонов с высокой подвижностью, выраженной предельным для измерения (253 мм) диаметром расплыва без встряхивания. Так четыре состава (1/0,5; 1,8/0,5; 1,4/0,54 и 1,95/0,4) расплываются под действием гравитационных сил на величину диаметра расплыва (рис. 3), превышающую диаметр встряхивающего столика. Также высокой способностью к «самостоятельному» уплотнению характеризуется состав 1,4/0,4, диаметра расплыва без встряхивания для которого составил 238 мм. При этом в выбранном диапазоне  $S_d$  и В/Ц наблюдаются составы, которые полностью сохраняют начальный диаметр расплыва после снятия усеченного конуса. К таким относятся составы с В/Ц менее 0,3. При этом эти же составы имеют диаметр расплава после встряхивания не превышающий значение 130 мм (рис. 4), что позволяет установить границы варьируемых факторов для дальнейших исследований. В качестве нижней границы для В/Ц для установления математических моделей

целесообразно установить величину 0,4, так такие составы растекаются на более чем 200 мм после встряхивания. Кроме того, минимальным содержанием пластифицирующей добавки может быть выбрано значение 1,0%.

## ВЫВОД

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод о возможности достижения положительных реологических показателей для получения самоуплотняющихся бетонных смесей на полых микросферах. Дальнейшие исследования следует осуществлять с учетом корректировки эффективных значений варьируемых факторов. Целесообразным является установление значений механических свойств исследуемых составов и оценку граничных значений однородности при варьировании плотности легкого бетона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лесовик В.С., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Энергоэффективные газобетоны на композиционных вяжущих для монолитного строительства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 3 (639). С. 10-20.
2. Белова Я.С., Воробьева Т.А., Кочеткова М.И., Маношкина Г.В. Применение модифицированных и самоуплотняющихся бетонов в высотном строительстве: новые возможности и перспективы // XVI Межвузовская научно-техническая конференция "Новые технологии в учебном процессе и производства" Рязань, 17–19 апреля 2018 года. 2018. С.146-150.
3. Несветаев Г.В., Давидюк А.Н. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава // Строительные материалы. 2009. № 5. С. 54-57.
4. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77-85.
5. Мозгалева К. М., Головнев С.Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2011. Вып. 4. С. 55-60.
6. Горюшин К. В. Самоуплотняющийся бетон в современной строительной индустрии // БУДУЩЕЕ НАУКИ -2020. Курск. 2020. Том 4.С.71-73.
7. Устименко М.Б., Михайлов А.С., Шрайбер Д.А. Самоуплотняющийся бетон // Дальний восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2019. Вып. 1-3. С. 455-459.
8. Фаликман В.Р., Денискин В.В., Калашиников О.О., Сорокин В.Ю. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона // Национальная ассоциация ученых. 2015. Вып. 2-3. С. 68-73.
9. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон и их перспективы // Новое слово в науке: стратегии развития. 2018. С. 10-14.
10. Сумин А.С. Легкий самоуплотняющийся бетон – будущее монолитного домостроения // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития. 2017. Том 1. С. 354-358.
11. Бычков М.В., Удодов С.А. Легкий самоуплотняющийся бетон как эффективный конструкционный материал // Интернет-журнал науковедение. 2013. Вып. 4. С. 41-47.
12. Патент РФ 2515450. Высокопрочный легкий бетон / Королев Е.В., Иноземцев А.С. Заявл. 11.10.2012. Оpubл. 10.05.2014. EDN: ZFOKEX
13. А.С. Иноземцев, Е.В. Королев. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. Вып. 10. С. 80-83.
14. Гринь О.В. Применение ячеистых бетонов с полыми керамическими микросферами // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. Вып. 7. С. 111-114.
15. ГОСТ 10178 – 85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия».
16. А.С. Иноземцев, Е.В. Королев. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах // Вестник МГСУ. 2013. Вып. 6. С. 100-108.
17. ASTM C230/C230M-21 «Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement».
18. ГОСТ 310.4—81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».
19. Шваенко Д.С. Повышение физико-механических свойств самоуплотняющегося бетона с помощью пластифицирующей добавки нового поколения и микрокремнезема // Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования. 2012. С. 473-477.

## ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНЫХ ВЯЖУЩИХ

О.А. Ларсен<sup>1</sup>, Ю.И. Марков<sup>2</sup>, В.К. Веселов<sup>3</sup>, В.В. Васютин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>1</sup>Uyra377@gmail.com, MarkovYUI@mgsu.ru

<sup>2</sup>larsen.oksana@mail.ru

<sup>3</sup>distveselov@mail.ru

<sup>4</sup>vasyutin365559@yandex.ru

### Аннотация

Приведены данные об уровне использования шлаков в мировых объемах. На основе шлаков возможно производство бесцементных вяжущих, которые могут применяться в технологии бетона. Рассматривается влияние состава шлакощелочных вяжущих их активизаторов твердения на основные свойства. Установлено, что наилучшими показателями обладают шлакощелочные вяжущие приготовленные на натриевом жидком стекле. Представлены области применения шлакощелочных вяжущих для производства аэродромных плит, плит покрытия площадей, пожароустойчивых конструкций, водостойких и химически стойких конструкций.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований для производства материалов изделий и конструкций все больше является применение материалов, уменьшающих вредное воздействие на окружающую среду.

В 21 веке строительство из бетона одно из основных способов возведения зданий и сооружений, но производство клинкера далеко не экологично. В каждой стране мира имеется множество производств, сопровождающихся образованием большого количества шлаков. Из всего объема, полученного в мире, используется только 2% шлака, остальные же 98% являются отходами, которые складывают либо на территории заводов, либо за пределами города. При долгом хранении эти шлаки проникают в землю и грунтовые воды, и экологическая ситуация в районах складирования складирования ухудшается. Каждый год только в России производится более 8 млрд. тонн отходов, в настоящее время уже накоплено более 80 млрд. тонн шлаков металлургической промышленности. Всего 8-10% отходов используется в промышленности. Бесклинкерная технология изготовления гидравлических вяжущих, позволяющих частично заменить портландцемент, при производстве которого используется огромное количество электроэнергии и материалов, в строительстве, поможет повысить экологическую ситуацию на мировом уровне.

Для уменьшения количества отходов, накопленных за долгие годы, рекомендуется изготавливать шлакощелочное вяжущее, для производства которого необходимы шлаки различных производств, например металлургического, на основе щелочного активизатора различного происхождения. Бетоны на основе шлакощелочных вяжущих имеют высокую морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионную стойкость и обладают прочностью от 20 до 100 МПа, со временем увеличивающуюся. Возможно применение заполнителей имеющих высокое содержание пылеватых и глинистых частиц. Такие бетоны можно использовать в агрессивных средах, подземном и геотехническом строительстве. В настоящее время его используют в струйной цементации грунтов и дорожном строительстве, но у данного материала огромные перспективы в других сферах производства материалов.

### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В данной работе приводится целесообразность использования шлакощелочных вяжущих в конструкциях, основные показатели, улучшающие качество шлакощелочных вяжущих,

анализ работы конструкций, построенных на основе шлакощелочных вяжущих, и их долговечность. В современных условиях в связи с большим объемом выбросов углекислого газа, выделяющегося при производстве портландцементного клинкера, появилась огромная необходимость в производстве альтернативных видов бесклинкерных цементов, в состав которых могут входить шлаки, активизируемые щелочным компонентом. Получаемые шлакощелочные бетоны имеют свойства, почти не уступающие портландцементным, а в некоторых случаях даже превосходит его по определенным показателям.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шлакощелочные вяжущие – двухкомпонентные вяжущие, в состав которых входит 90-95% шлака и 5-10% щелочного компонента. Активация шлаков осуществляется едкими щелочами и смесью солей щелочных металлов с известью. Как щелочной компонент, зачастую используют водные растворы  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KOH}$ . Новообразования в таких бетонах представлены гидросиликатами кальция низкой основности, щелочными гидроалюмосиликатами и твердыми щелочными и щелочноземельными алюмосиликатами их кристаллического раствора.

Таблица 1 Влияние удельной поверхности и зернового состава на свойства шлакощелочного вяжущего [8]

Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$	Водопотребность, %	Сроки схватывания, ч-мин		Прочно при сжатии, Мпа, после	
		начало	конец	28 сут.	ТВО
182,9	29	0-43	2-28	41,65	59,98
298,1	33	0-32	1-36	58,58	72,74
455,2	41	0-31	1-28	48,29	60,79
570,7	46	0-29	1-08	47,80	57,33
620,5	52	0-21	0-55	36,97	60,35
700,1	59	0-10	0-47	64,52	72,80

По данным таблицы 1 видим, что при увеличении удельной поверхности увеличивается нормальная густота, а сроки схватывания уменьшаются. Шлакощелочной раствор имеет низкую сохраняемость, поэтому чтобы замедлить сроки схватывания рекомендуется вводить в раствор гидроксид натрия. Введение гидроксида натрия в жидкое стекло благоприятно сказывается на вяжущих свойствах материала, он снижает вязкость жидкого стекла, за счет разрушения кремнекислородных связей в жидком стекле. Добавка алюмосиликатов способствует уменьшению высолообразований также, как и повышению прочности в шлакощелочных вяжущих. Наиболее оптимальное содержание добавки по массе шлака составляет 5%.

По результатам исследований [8] была составлена таблица прочности полученного бетона с использованием добавок разного процентного соотношения и при пропаривание в камере ТВО и на 28 сутки твердения.

Таблица 2 Прочность шлаковых вяжущих в зависимости от вида активатора [8]

Вид активатора	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Добавка, %	Предел прочности при сжатии, МПа	
			через 28 сут.	После ТВО
NaOH	1150	-	21,10	23,27
	1170		23,48	26,33
	1200		23,51	27,55
	1230		26,76	28,00
	1250		27,21	32,82
CaO	-	5	6,12	7,89
		10	7,35	8,65
		15	8,51	9,71
Na <sub>5</sub> P <sub>3</sub> O <sub>10</sub>	-	5	3,87	23,55
		10	6,92	42,73
		15	4,71	26,49
Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>2</sub>	1200	-	53,7	49,6

Из данных таблицы 2 следует, что из рассмотренных выше добавок-активаторов наибольшее активизирующее воздействие достигается при применении натриевого жидкого стекла как при хранении в нормальных условиях, так и после тепловой обработки. Основным показателем, указывающим на хорошие вяжущие свойства, является тонкость помола. Имеется несколько видов шлаков: мелкий (0-20 мкм) и крупный (20-100 мкм). Фракция выше 100 мкм хуже реагирует с щелочами и показывает больше свойства заполнителя нежели является самостоятельным вяжущим.

Растворошлаковое отношение также влияет на качество шлакового вяжущего не меньше чем условия твердения и т.д., но удельная поверхность и зерновой состав используемых шлаков являются определяющими для будущих свойств бетона на основе шлакощелочного вяжущего.

У шлакощелочных вяжущих есть довольно существенный минус – стоимость. Разница между классическим портландцементом и шлакощелочным вяжущим может составлять от 1,2 до 2 раз. Основная часть стоимости шлакощелочного вяжущего при производстве определяется его дорогим помолом. Традиционно для размолла шлака используют трубные мельницы, их недостаток – высокое электропотребление, в следствие агрегирования частиц при помоле, материал налипает на рабочие поверхности из-за чего появляется недостаток взаимодействия мелющих тел на материал. Это не только снижает производительность, но и сильно влияет на качество конечного продукта.

Несмотря на низкую популярность и дороговизну производства изделий и конструкций из шлакощелочных вяжущих имеется не мало примеров успешного применения в строительной отрасли. С 1973 года в России было налажено производство ШЩБ, на заводах Западного Урала. Там изготавливались фундаментные блоки, детали очистных сооружений, плиты покрытия площадей, сваи [9]. С 1975 г. по 1980г. на заводах г. Тулы выпускали преднапряженные аэродромные плиты, бордюрные камни, тротуарные плиты, кирпичи, блоки стен подвалов.

В настоящее время в России имеется несколько заводов по производству шлакощелочных бетонов. Одно из них находится в г. Зеленоград. На данный момент там производятся различные бетоны: тяжелые, теплоизоляционные, конструкционные, высокопрочные, жаростойкие, ячеистые и прочие материалы. Также из шлакощелочных

бетонов производят пожаробезопасный искусственный камень. Такое свойство ШЩБ получает благодаря одинаковому коэффициенту расширения всех компонентов раствора. Максимальная температура нагрева такого бетона составляет 1500°С.

## ВЫВОДЫ

В ходе работы было выяснено, что основными показателями качествами шлакощелочного бетона является активатор шлака, его тонкость помола и условия твердения. По полученным данным наиболее для получения наиболее высоких прочностных показателей в качестве добавки-активатора лучше всего использовать натриевое жидкое стекло, при этом активаторе была показана наивысшая прочность равная 53,7 МПа на 28 сутки твердения. По результатам испытаний, полученных в статье [8] самую высокую прочность, показал шлак, размолотый до удельной поверхности равной 700 м<sup>2</sup>/кг, при данном значении прочность после камеры пропаривания показала 72,8 МПа.

Основной минус шлакощелочного бетона – стоимость шлакощелочного вяжущего, которая образуется за счёт высокой стоимости размола шлака.

Шлакощелочные бетоны можно использовать в качестве ограждающих конструкций при сдерживании грунта, например метод струйной цементации грунтов. В настоящее время они не имеют высокой распространённости и из такого бетона делают различные плиты перекрытий, водо-химически стойкие фундаменты и ограждающие конструкции, пожароустойчивые искусственные камни. В 70-е года 20 века из ШЩБ заливали сваи, аэродромные плиты, плиты для покрытия площадей, бордюрные камни и т.д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны // Будівельник. 1978.
2. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Алексеев А.А. Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов // «Вестник МГСУ» научно-технический журнал по строительству и архитектуре 2019. Том 14. Вып. 6
3. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Виноградова Е.А., Бородин Л.М. Бетоны с органоминеральной добавкой на основе тонкомолотого шлака медеплавильного производства // «Вестник МГСУ» научно-технический журнал по строительству и архитектуре 2016. Том 2.
4. Саламонова М.Д., Гацаев З.Ш., Сызранцев В.В. Исследование свойств щелочных вяжущих материалов с добавкой тонкодисперсного бентонита «Вестник МГСУ» научно-технический журнал по строительству и архитектуре 2022. Том 17. Выпуск 8.
5. Бурак Г.А., Меженцев А.А., Ковалев Я.Н., Яглов В.Н. Шлакощелочные вяжущие на основе местного сырья для укрепления покрытий дорог низких категорий // «Автомобильные дороги и мосты» №2(12), 2013. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/13907/C.%2048-53.pdf?sequence=1> Дата обращения: 15.12.2022
6. Калмыкова Ю.С. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных шлаков металлургических предприятий Украины // Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», 2013, № 113. Режим доступа: [https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1670786573&tld=ru&lang=ru&name=2013\\_19\\_str\\_121\\_128.pdf&text1Дата обращения: 15.12.2022](https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1670786573&tld=ru&lang=ru&name=2013_19_str_121_128.pdf&text1Дата обращения: 15.12.2022)
7. Абу Махади М.И., Безбородов А.В. Применение шлакощелочных вяжущих в строительстве // «Вестник РУДН» Том 18 №2 212-218. Режим доступа: [https://docviewer.yandex.ru/view/1496586111/?page=1&\\*=](https://docviewer.yandex.ru/view/1496586111/?page=1&*=) Дата обращения: 15.12.2022
8. Артамонов А.В. Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежно-ударного измельчения // Интернет сайт Урал-Омега. Режим доступа: [https://uralomega.ru/pressroom/in\\_the\\_media/shlakowelochnye\\_vyazhuwie\\_na\\_osnove\\_domennyh\\_granulirovannyh\\_shlakov\\_centrobezhno-udarnogo\\_izmel\\_cheniya/](https://uralomega.ru/pressroom/in_the_media/shlakowelochnye_vyazhuwie_na_osnove_domennyh_granulirovannyh_shlakov_centrobezhno-udarnogo_izmel_cheniya/)
9. Шлаковые бетоны: состав, типы, применение // Интернет сайт Бетон-М. Режим доступа: <https://avkbeta.ru/shlakoshhelochnye-beton/>. Дата обращения: 15.12.2022

# ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

С.В. Шашкин<sup>1</sup>, А.А. Аскадский<sup>2</sup>, Т.А. Мацевич<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,

<sup>2</sup>Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва,

<sup>1</sup>forbic@list.ru

<sup>2</sup>andrey@ineos.ac.ru

<sup>3</sup>matsevichta@mgsu.ru

## Аннотация

Исследованы композиты на основе поливинилхлорида (ПВХ) и их реакция на температурное воздействие. Образцы состояли на 80% из минерального наполнителя и на 20% из ПВХ. Произведены измерения релаксации напряжения образцов композитов на приборе Дубова-Регеля, модифицированном для автоматического задания деформации образца и температуры измерений. В рамках испытаний проведены эксперименты при комнатной температуре и при температуре 85°C. Результаты экспериментов обработаны с помощью специальной компьютерной программы, позволяющей аппроксимировать полученные экспериментальные данные с помощью уравнения Больцмана-Вольтерры. Полученные данные с помощью аппроксимации релаксационных кривых свидетельствуют о том, что ядро релаксации  $T_1(\tau)$ , предложенное Аскадским А.А. [5, 6, 9], при подстановке в уравнение Больцмана-Вольтерры, лучше всего описывает процесс релаксации напряжения. В результате проведенных экспериментов было показано, что начальное и квазиравновесное напряжение существенно снизились при повышении температуры до 85°C, что свидетельствует о невозможности использования поливинилхлорида в качестве связующего в композиционных материалах в условиях повышенного тепловыделения.

## ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве перед инженерами стоит задача оптимизации надежности, безопасности, в том числе и экологической, и дешевизны проектируемой конструкции. Привычные натуральные материалы надежны и безопасны, но, зачастую, не отвечают соображениям экономии средств. Синтетические материалы, воспроизводимые из нефтяных продуктов крайне токсичны для природы из-за невозможности безопасного разложения в нормальных условиях. Для оптимального соотношения вышеизложенных признаков разработаны натурально-синтетические композиты. Они объединяют в себе экологичность натуральных и низкую стоимость синтетических материалов. Актуальной задачей при исследовании таких материалов является прогноз механических свойств на длительное время эксплуатации, что было сделано на основе испытаний данных материалов на релаксацию напряжения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов экспериментального исследования были использованы следующие материалы. Образцы состоят поливинилхлорида (ПВХ) в количестве 20% и минерального наполнителя в количестве 80%. Испытания на релаксацию напряжения проводили при комнатной температуре и при температуре  $T = 85^\circ\text{C}$ . Перед исследованиями релаксационных свойств получали кривые сжатия с последующей оценкой модуля упругости и прочности. Это определялось на приборе для микромеханических испытаний конструкции Дубова-Регеля, который был дополнительно модифицирован с целью



компьютерного задания скорости деформации, построения кривых сжатия, расчета модуля упругости, задания температуры испытаний.

Для объективной оценки механической работоспособности полимерных материалов наиболее важны релаксационные свойства, описанные в [1, 2]. Они определяют способность материала сохранять достаточные напряжения при длительном действии постоянной и переменной деформации в любых температурных условиях и в любых агрессивных средах.

К настоящему времени для описания процесса релаксации и ползучести используются различные варианты ядер, входящих в уравнение Больцмана-Вольтерры. В работе [5] предложены новые ядра релаксации, основанные на рассмотрении изменения энтропии системы в ходе релаксационного процесса. Процесс релаксации напряжения происходит в результате взаимодействия и диффузии кинетических единиц – релаксаторов. Релаксаторами могут быть различные атомные группы, повторяющиеся звенья, более крупные фрагменты и целые сегменты макромолекул. К релаксаторам относятся также отдельные элементы свободного объема. Эти микрополости могут взаимодействовать друг с другом, вследствие чего могут сливаться, изменяться в объеме и т.д., образуя такую структуру, которая способствует снижению релаксирующего напряжения. Тогда полимерный материал можно рассматривать как состоящий из релаксаторов и нерелаксаторов. Возникновение частиц двух сортов (релаксаторов и нерелаксаторов) и их диффузия приводят к производству энтропии системы, которая возрастает в ходе релаксации напряжения [1, 5].

В ядро релаксации  $T_1(\tau)$  входит величина  $\alpha$ , которая связана с кинетикой процесса межмолекулярного взаимодействия релаксаторов в ходе релаксационного процесса. Изменение  $\alpha$  со временем  $\tau$  может быть обусловлено, как было сказано выше, двумя причинами: взаимодействием релаксаторов и их диффузией в материале. Если процесс релаксации напряжения лимитируется скоростью взаимодействия релаксаторов, действует ядро  $T_1(\tau)$ :

$$T_1(\tau) := -\frac{S_0}{k_B m_1} \cdot \frac{1}{(\alpha - \alpha_0) \ln(\alpha - \alpha_0) + (1 - \alpha + \alpha_0) \ln(1 - \alpha + \alpha_0)} - \frac{1}{\ln 0.5} \quad (1)$$

Величина  $\alpha$  определяется соотношением

$$\alpha = \frac{c}{c_0} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k^* \tau}{\beta}\right)^\beta} \quad (2)$$

где  $k^* = k c_0^{n-1}$ ,  $\beta = 1/(n-1)$ ,  $n$  – порядок реакции взаимодействия релаксаторов,  $c_0$  – начальная концентрация релаксаторов любого типа,  $k^*$  – константа скорости взаимодействия релаксаторов,  $S_0$  – начальная энтропия системы (образца),  $k_B$  – константа Больцмана,  $m_1$  – количество релаксаторов в образце.

Если процесс релаксации лимитируется скоростью диффузии релаксаторов, действует ядро

$$T_2(\tau) := -\frac{S_0}{k_B m_2} \cdot \left( \frac{1}{\alpha \tau^\gamma \ln \alpha \tau^\gamma + (1 - \alpha \tau^\gamma) \ln(1 - \alpha \tau^\gamma)} - \frac{1}{\ln 0.5} \right) \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{\alpha}{2}$ ,  $0 < \gamma < 1$ ,  $\alpha$  – константа, которая является мерой количества мест, занимаемых кинетическими единицами в процессе их беспорядочного блуждания на решетке.

Ядра (1) и (3) позволяют описывать процессы релаксации с большой точностью, а также оценивать физические параметры материала – величину  $A = \frac{m^*}{S_0}$ , пропорциональную количеству неоднородностей в материале,  $k^*, \gamma, \alpha, \sigma_0$  – напряжение, которое возникает

после мгновенного задания деформации;  $\sigma_\infty$  – квази-равновесное напряжение, устанавливающееся при  $t \rightarrow \infty$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таблица 1. Параметры ядер релаксации при проведении эксперимента при комнатной температуре

Параметры ядра	Для образца №1	Для образца №2
Ядро $T_1(\tau)$		
$k^*$ , мин <sup>-1</sup>	0.01	0.01
$\beta$	0.3	0.3
$r$	0.9952	0.994
$A_1$ , Дж·кг·град/м <sup>3</sup>	$9.82 \times 10^{24}$	$9.79 \times 10^{24}$
$\sigma_0$ , МПа	68.56	65.31
$\sigma_\infty$ , МПа	32.93	31.41
Ядро $T_2(\tau)$		
$a$ , мин <sup>-1</sup>	0.05	0.05
$\gamma$	0.5	0.5
$r$	0.9709	0.9654
$A_1$ , Дж·кг·град/м <sup>3</sup>	$2.4 \times 10^{23}$	$2.33 \times 10^{23}$
$\sigma_0$ , МПа	48.99	47.12
$\sigma_\infty$ , МПа	33.65	32.11
Экспериментальные данные		
$\sigma_0$ , МПа	54.8	52.1
$\sigma_\infty$ , МПа	32.35	31.28

По экспериментам при комнатной температуре использование ядра  $T_1(\tau)$  приводит к наибольшему коэффициенту корреляции  $r$ .

Для аппроксимации полученных экспериментальных данных по уравнению Больцмана-Вольтерры с использованием ядер релаксации (1) и (3) в работах [1, 2-4, 8] была написана специальная компьютерная программа. В программе каждая экспериментальная зависимость  $\sigma(t)$  аппроксимируется уравнением Больцмана-Вольтерры с ядрами (1) и (3) и автоматически выбираются такие пары значений  $k^*$  и  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $a$ , при которых коэффициент корреляции является максимальным.

Таблица 2. Параметры ядер релаксации при проведении эксперимента при 85°C.

Параметры ядра	Для образца №1	Для образца №2
Ядро $T_1(\tau)$		
$k^*$ , мин <sup>-1</sup>	0.1	0.1
$\beta$	0.2	0.2
$r$	0.9758	0.9678
$A_1$ , Дж·кг·град/м <sup>3</sup>	$1.16 \times 10^{24}$	$1.14 \times 10^{24}$
$\sigma_0$ , МПа	16.77	15.98
$\sigma_\infty$ , МПа	1.81	1.76
Ядро $T_2(\tau)$		
$a$ , мин <sup>-1</sup>	0.05	0.05
$\gamma$	0.5	0.5
$r$	0.9031	0.8995
$A_1$ , Дж·кг·град/м <sup>3</sup>	$2.257 \times 10^{24}$	$2.146 \times 10^{24}$

$\sigma_0$ , МПа	6.19	5.78
$\sigma_{\infty}$ , МПа	1.47	1.35
Экспериментальные данные		
$\sigma_0$ , МПа	9.909	9.75
$\sigma_{\infty}$ , МПа	1.403	1.21

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментов по релаксации напряжения показано, что релаксационные кривые лучше аппроксимируются с помощью уравнения Больцмана-Вольтерры с применением ядра релаксации  $T_1(\tau)$ . Коэффициент корреляции при этом близок к 1. Следовательно, лимитирующей стадией релаксационного процесса является скорость взаимодействия релаксаторов, а не скорость диффузии продуктов взаимодействия. При нагреве образцов до 85°C заметно резкое падение релаксирующего напряжения вблизи 85 °С. Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение ПВХ в качестве связующего для композитов недопустимо в местах с повышенным тепловыделением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Аскадский А.А., Хохлов А.Р.* Введение в физико-химию полимеров. – М.: Научный мир. 2009. –384 с.
2. *Аскадский А.А., Ван С., Курская Е.А., Кондращенко В.И., Жданова Т.В., Мацевич Т.А.* Возможности предсказания коэффициентов термического расширения материалов на основе поливинилхлорида // Строительные материалы. – 2019. – № 11. – с. 65–67.
3. *Аскадский А.А., Мацевич А.В., Пиминова К.С., Горбачева О.А., Мацевич Т.А., Кондращенко В.И.* Релаксационные свойства террасных досок с комбинированным древесным и минеральным наполнителем // Строительные материалы. – 2019. – №3. – С. 57–63.
4. *Аскадский А.А., Пиминова К.С., Мацевич А.В.* Релаксационные свойства террасных досок, изготовленных из древесно-полимерных композитов (ДПК) // Строительные материалы. – 2018. – № 6. –С. 45–52.
5. *Аскадский А.А.* Новые возможные типы ядер релаксации // Механика композитных материалов. – 1987. –с. 403–409.
6. *Аскадский А.А., Суков Г.В., Немчинов В.В., Блюменфельд А.Л., Вихускас З.С.* Ядро релаксации, учитывающее обратимый характер взаимодействия релаксаторов // Высокомолекулярные соединения. – 1989. – № 6. – с. 1320–1326.
7. *Аскадский А.А., А.И. Марма, Р.Б. Банявичюс, Вихускас З.С.* Анализ релаксационных процессов с полибензоксазоле с помощью новых ядер релаксации. // Высокомолекулярные соединения. – 1989. – № 11. – с.2271–2276.
8. *Аскадский А.А., Кондращенко В.И.* Компьютерное материаловедение полимеров т.1 Атомно-молекулярный уровень. – М.: Научный мир. 1999. – с. 544.
9. *Аскадский А.А., Гальперн Е.Г., Суков Г.В., Булатов В.В., Слонимский Г.Л.* Поиск полимеров с заданными физико-химическими свойствами с помощью ЭВМ // Высокомолекулярные соединения. – 1987. – №11. –с. 2433–2440. п

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

**О.А. Ларсен, А.М. Бахрах, А.А. Солодов, К.А. Бутенко, В.К. Веселов**  
*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,*

Строительство современных административных и жилых зданий и сооружений с особой архитектурной выразительностью становится все более востребованным и актуальным. Этим требованиям могут соответствовать бетонные и железобетонные конструкции, применяемые в качестве фасадных элементов зданий изготовляемые из самоуплотняющегося бетона.

Проектирование состава СУБ в соответствии с [1, 2, 3] начинается с выбора основных составляющих. При подборе состава самоуплотняющегося бетона необходимо применение высокоэффективных добавок разжижжителей. В мировой практике существует три основных подхода к проектированию состава СУБ: применение повышенного содержания тонкодисперсных компонентов в виде золы-уноса, доменного гранулированного шлака или карбонатного микронаполнителя; применение стабилизаторов в виде регуляторов вязкости для предотвращения водоотделения; сочетание тонкодисперсных компонентов и регуляторов вязкости [4]. Содержание тонкодисперсной части, содержащей вяжущее и микронаполнитель, может варьироваться от 380 до 600 кг/м<sup>3</sup>. В соответствии с [3] содержание цемента не должно превышать 500 кг/м<sup>3</sup> для того, чтобы избежать усадки бетона. При этом содержание крупного заполнителя с максимальной крупностью 20 мм должно составлять 28-35% от общего объема смеси. Содержание мелкого заполнителя должно находиться в пределах 48-55% от общей массы заполнителя при содержании воды около 210 кг/м<sup>3</sup>.

В соответствии с российским стандартом ГОСТ Р 59714- 2021 «Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия» расход цемента в СУБ должен находиться в диапазоне от 300 до 500 кг/м<sup>3</sup> при общем содержании тонкодисперсных компонентов в составе самоуплотняющегося бетона, в количестве от 550 до 600 кг/м<sup>3</sup>.

По мнению авторов [5] рекомендуется считать микронаполнителем частицы с размером менее 90 мкм, в то время как в европейском стандарте [2] к микронаполнителям относятся частицы размером менее 125 мкм.

Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей значительно зависят от применяемых вяжущих и микронаполнителей [6]. Чтобы предотвратить расслоение цементного теста, содержащегося в большом количестве в самоуплотняющихся смесях первого типа, используют вяжущие вещества и микронаполнители, обладающие достаточной водоудерживающей способностью, объясняемой оптимальным гранулометрическим составом частиц и высокой тонкостью помола, что придает бетону необходимую связанность. Поэтому важное значение имеет водоудерживающая способность микронаполнителей и их поведение при увеличении количества воды в смеси, что может привести к водоотделению и расслоению. Испытание на растекаемость непосредственно приведет к тому, что требования к воде будут соответствовать требованиям для проектирования и производства самоуплотняющихся смесей.

Водопотребность тонкодисперсных материалов является важным параметром при проектировании состава самоуплотняющегося бетона. В связи с этим определение водопотребности применяемых тонкодисперсных материалов имеет важное значение для обеспечения самоуплотняемости смеси. Она представляет собой слой адсорбированных молекул воды вокруг частиц и дополнительного количества воды, необходимого для заполнения межзерновых пустот тонкодисперсных частиц. В связи с тем, что тонкодисперсные частицы цемента и микронаполнителей занимают большую часть общей удельной поверхности, они оказывают самое сильное влияние на общую водопотребность

бетонной смеси. Следовательно, наиболее целесообразным является их наименьшая водопотребность, правильное определение которой для самоуплотняющегося бетона очень важно для покрытия всех частиц слоем воды определенной толщины. Содержание воды, помимо степени гидратации, а также типа и количества цемента, в основном отвечает за процентное содержание капиллярных пор. Для полной гидратации портландцемента по [6] необходимо около 40%, из которых требуется около 28% воды для прохождения реакций, около 12% воды относится к физически связанной воде, находящейся в порах геля. Вся остальная вода, добавленная в избытке, используется только для обеспечения подвижности смеси [7].

Существуют различные способы определения водопотребности. Для определения водопотребности дисперсных материалов, то есть минимального количества воды для получения теста стандартной консистенции, применяемых для производства самоуплотняющихся бетонных смесей, проводят испытание на растекаемость соответствии с [5]. С помощью этой методики можно идентифицировать материалы, которые имеют тенденцию к водоотделению или расслоению на тесте, не усложняя процесс приготовления по сравнению с растворными или бетонными смесями.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе применялись следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н производства ОАО «Щуровский цемент»
- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н СС ПАО производства АО «Мордовцемент»
- шлак доменный молотый GGBS 4500 ОАО «Мечел»
- микрокальцит РМ60 ООО «Микрокальцит»
- микрокальцит Омукарб 5-kv

Определение водопотребности тонкодисперсных компонентов проводилось на тесте с различными водотвёрдыми соотношениями с использованием формы-конуса Хагермана.

Для определения водопотребности каждого из тонкодисперсных компонентов готовилось тесто с различным количеством воды. После перемешивания по методике ГОСТ 30744 тесто укладывали в коническую форму-конус. Для определения диаметра расплыва применялась стеклянная пластина. Далее измерялся диаметр расплыва теста в двух перпендикулярных направлениях (рис. 1) и рассчитывалось среднее значение относительного диаметра расплыва ( $D_{отн}$ ):

$$D_{отн} = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1,$$

$$\text{где } d = \frac{d_1 + d_2}{2};$$

$d_1$  и  $d_2$  – диаметры расплыва теста в двух перпендикулярных направлениях;

$d_0$  - диаметр основания конуса, равный 100 мм.

Относительный диаметр расплыва  $D_{отн}$  был впервые введен Окамурой и Одзавой (1995) как относительная площадь диаметра расплыва  $R$ . Приготовленное тесто не должно иметь признаков расслоения или водоотделения.

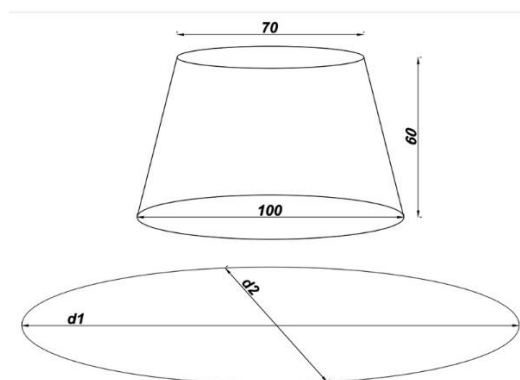


Рис. 1. Характеристики Конуса для проведения эксперимента по определению водопотребности и метод измерения

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе измерения можно определить водопотребность для каждого материала с помощью уравнения линейной регрессии, в котором присутствует коэффициент водопотребности  $K_{вп}$  и коэффициент деформации  $K_d$ , представляющий собой наклон линейной функции или степень чувствительности к водоотделению. Дисперсные материалы с более низким  $K_{вп}$  коэффициентом водопотребности и, следовательно, имеющие меньшее значение коэффициента деформации  $K_d$ , будут в большей степени подвержены водоотделению. Таким образом, небольшие изменения в увеличении количества воды в смеси оказывают более сильное влияние на относительный диаметр расплыва. Вероятность водоотделения становится выше с уменьшением количества вяжущего и увеличением содержания наполнителя, проявляющего большую чувствительность к изменениям количества воды. То есть чем более пологая кривая, тем меньше коэффициент деформации и тем большая вероятность наполнителя к водоотделению.

Таблица 1 Данные испытаний по водопотребности тонкодисперсных компонентов

Материал	коэффициент водопотребности $K_{вп}$ при $D_{отн}=0$	Коэффициент деформации $K_d$	Консистенция смеси при $D_{отн}=0$
Доменный молотый шлак GGBS 4500	0,4318	0,0297	отсутствие расслоения или водоотделения
PM60	0,346	0,0259	отсутствие расслоения или водоотделения
Оmyacarb 5-kv	0,362	0,0307	отсутствие расслоения или водоотделения
Портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н ОАО«Щуровский цемент»	0,3375	0,0315	отсутствие расслоения или водоотделения
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н СС «Мордовцемент»	0,3621	0,0289	отсутствие расслоения или водоотделения

### ВЫВОДЫ

Было установлено, что все исследованные смеси из тонкодисперсных компонентов не обнаружили водоотделения или расслоения при проведении эксперимента. Из полученных данных, представленных в таб. 1 установлено, что, например, для расплыва цемента ЦЕМ 0 42,5Н Щуровского цементного завода необходимо, если  $V/C > 0,3375$ .

Наибольшим коэффициентом водопотребности  $K_{вп}$  отличался доменный молотый шлак GGBS 4500, имеющий самую высокую удельную поверхность из исследованных материалов, коэффициентом деформации  $K_d$ , равный 0,0297. Наименьший коэффициент водопотребности  $K_{вп}$  был получен у портландцемента ЦЕМ 0 42,5Н ОАО Щуровского цементного завода с коэффициентом деформации  $K_d$ , равным 0,0315. Это означает, что материалы с более низким коэффициентом водопотребности и, следовательно, имеющие наименьший коэффициент деформации, будут более подвержены водоотделению в СУБ смесях. Таким образом, небольшие изменения в содержании воды оказывают более сильное влияние на относительный диаметр расплыва.

Данная методика позволяет выявить материалы, которые будут больше подвержены водоотделению или расслоению раньше, чем другие материалы в строительных растворах и бетонных смесях. Вероятность такого негативного поведения становится выше с уменьшением количества цемента и с большим количеством наполнителей, проявляющих сильную чувствительность к изменениям количества воды при низком коэффициенте деформации  $K_d$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. *De Schutter G.* Testing SCC - guidelines for testing fresh self-compacting concrete // European Res Project. 2005.
2. EFNARC // Specification and guidelines for self-compacting concrete. 2002.
3. EFNARC // The European guidelines for self-compacting concrete specification, production and use. 2005.
4. *Holschemacher, K. and Klug, Y.* A database for the evaluation of hardened properties of SCC // LACER - The Leipzig Annual Civil Engineering Report (7): 123 – 134. 2002.
5. *Okamura, H., and Ouchi, M.* Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology, 1(1), 5-15. 2003.
6. *Taylor HFW.* Cement chemistry // 2nd ed. London: Thomas. 1997
7. *Баженов Ю.М.* Технология бетона 215-220. 2014.

# О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНА НА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ

**Н.Р. Ванькова**

*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», 190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, д. 19,  
vankovaperm@mail.ru*

## **Аннотация**

Испытания бетона на водонепроницаемость, проводимые по ГОСТ 12730.5-2018, относятся наряду с прочностью к основным видам испытаний. В работе показано, что теоретической основой испытаний бетона на водонепроницаемость, является аналитическая модель движения жидкости, базирующаяся на уравнениях неразрывности потока и линейного закона Дарси. Рабочие формулы, полученные в ходе подтверждения этого, согласуются с условиями проведения испытаний и формулами расчета водонепроницаемости ГОСТ 12730.5. Однако, физическая модель процесса проницаемости бетона не учитывает его особенность - преимущественно капиллярный механизм переноса жидкости. По этой причине методы испытаний, формулы расчета ГОСТ 12730.5, могут только приблизительно дать оценку водонепроницаемости бетона.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из направлений строительной сферы является производство строительных материалов и конструкций, которое интенсивно развивается, несмотря на экономические трудности последних лет. В целом производство строительных материалов обеспечивает отрасль необходимым объемом продукции, но направление страдает технологическим отставанием от зарубежных аналогов производства, износом основных фондов порядка 50 %, качество продукции не всегда соответствует современным требованиям [1].

В связи с этим значительную роль играет повышение важности стандартизации и нормативно-технического регулирования продукции и методов ее испытаний, совершенствование работ по метрологическому обеспечению, развитие строительной измерительной техники. Знания теоретических основ методов испытаний способствует повышению качества испытаний строительных материалов, созданию и внедрению инновационных материалов и технологий.

Наиболее распространенным строительным материалом уже долгое время остается бетон. Его качество является фактором надежности и долговечности бетонных и железобетонных конструкций. Категория «гидротехнического бетона» занимает отдельную нишу, относится к виду тяжелых бетонов и востребована при возведении гидротехнических сооружений (плотины, гидростанции, каналы, тоннели, шлюзы, причалы и др.). Наряду с прочностью для гидротехнического бетона второй важнейшей характеристикой является показатель водонепроницаемости.

Водонепроницаемость – это способность противостоять проникающему действию воды [2]. В действительности, под характеристикой водонепроницаемости бетона понимают его способность не пропускать воду через свою толщу под определенным давлением.

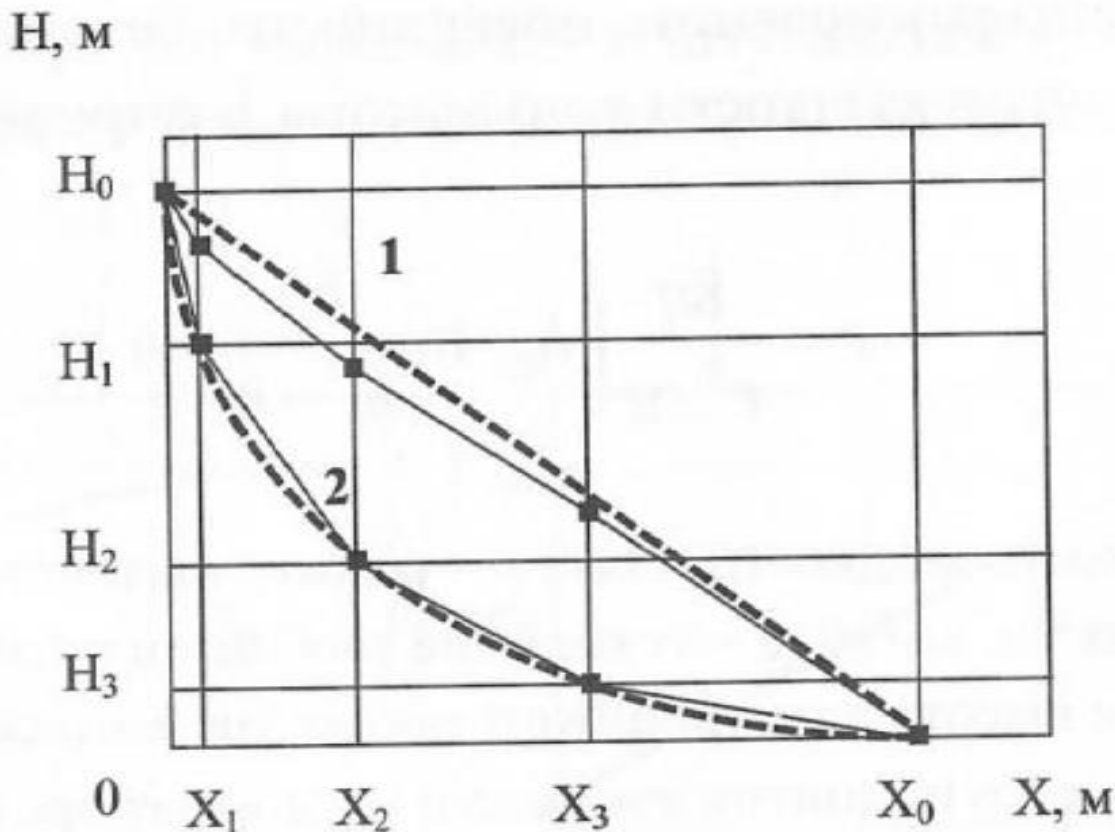
## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Гидротехнический бетон, технические требования к которому содержатся в ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», как и любой бетон делится по водонепроницаемости (W), на марки от 2W до 20W. Цифра за буквой «W» означает величину избыточного давления в МПа (или в кгс/см<sup>2</sup>), при котором испытываемый образец не пропускает воду. Бетон до марки 4W принимают низкопроницаемым (использование только в сухих помещениях и в помещениях с



гидроизоляции), от 4W до 12W считают средней проницаемости (при условиях периодического контакта с водой, например, фундаменты, крыши, наружные стены и т.д.), от 12W до 20W – высокой водонепроницаемости (для строительства сооружений, постоянно находящихся в воде, например, дамбы, плотины, водоканалы, бассейны и т.д.).

Исследования показали, что закон падения давления напора близок к обратно пропорциональной зависимости и теряет свою линейность лишь в течение длительной фильтрации (рисунок 1) [3], что объясняется коагуляцией пор при отложении на их стенках солей, содержащихся в фильтрующей жидкости.



**Рис. 1.** Распределение напора в образце бетона при фильтрации воды:  
1, 2 – после 1-х и 15-ти суток фильтрации

Водонепроницаемость слоя бетона на расстоянии от напорной грани до пьезометра, который определяет величину напора в данной точке образца, равна разности прикладываемого давления к напорной грани и местного напора. Поэтому, водонепроницаемость определяется следующей зависимостью [4]:

$$W \approx H_0 - \frac{H_0 x}{x_0}, \quad (1)$$

где  $W$  – водонепроницаемость, МПа;  $H_0$  – начальный гидравлический напор, м;  $x$  – толщина бетона, или расстояние от напорной грани, м;  $x_0$  – расстояние от напорной грани, где напор равен нулю, м.

Марку бетона по водонепроницаемости определяют:

$$I = \frac{\Delta H}{L}, \quad (2)$$

где  $\Delta H$  – высота водяного столба, действующего на бетон, см;  $L$  – толщина бетонной конструкции, см.

Методы испытаний на водонепроницаемость бетона содержатся в ГОСТ 12730.5 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости», определяющего 4-е основных

метода испытаний: «мокрого пятна», «по глубине проникновения воды под давлением», коэффициент фильтрации и «по воздухопроницаемости». Первые три метода относятся к прямым методам испытаний, т.к. отражают непосредственно процесс фильтрации жидкости через бетон. Последний метод относится к косвенным методам, т.к. путем определения воздухопроницаемости бетона определяется водонепроницаемость.

*Базовый метод по «мокрому пятну».* Для этого метода согласно ГОСТ 12730.5 гидростатическое давление, приложенное к одной из граней образца бетона, увеличивают ступенями по 0,2 МПа с выдержкой на каждой ступени по 16 часов для образцов-цилиндров 150x150 мм до появления явления протекания на противоположной грани. Водонепроницаемость комплекта из 6 образцов определяется условным показателем – максимальным давлением воды, МПа, при котором не протекли 4 из 6 образцов бетона. Марку по водонепроницаемости принимают по таблице 3 ГОСТ 12730.5. Длительность и сложность проведения испытаний базовым методом поставило необходимость разработать более быстрые методы.

*Метод по «коэффициенту фильтрации»* представляет собой измерение объема воды, проходящей через образец в течение определенного времени под определенным давлением. Коэффициент фильтрации – объем флюида, проникающего через единицу сечения за единицу времени при единичном градиенте напора, см/с. Переход от коэффициента фильтрации к водонепроницаемости в МПа происходит только через марку водонепроницаемости по таблице 6 ГОСТ 12730.5.

*Метод «по глубине проникновения воды под давлением».* Образец испытывают на установке для проведения испытаний по «мокрому пятну», передавая заданное давление воды, поддерживаемое в течение определенного времени. После этого образец раскалывают, по границе между влажной и сухой частями определяют глубину проникновения воды (см) и оценивают водонепроницаемость бетона. Марку по водонепроницаемости принимают по таблице А.1 ГОСТ 12730.5.

*Метод «по воздухопроницаемости»* основан на установленной статистической зависимости между воздухопроницаемостью бетона и его водонепроницаемостью, определенной по методу «мокрого пятна». В качестве параметра воздухопроницаемости используют значение времени, за которое давление в камере устройства опускается до определенного значения, затем, используя градуировочную зависимость, назначается марка бетона по водонепроницаемости.

Сопrotивление материала проникновению воздуха,  $\text{с/см}^3$ , производится по формуле:

$$m = \frac{\Delta t}{0,423 \ln \left( \frac{P_{\text{вак0}}}{P_{\text{вак1}}} \right) V_k} \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – время, в течение которого произошло падение вакуумметрического давления, с;  $P_{\text{вак0}}$  – начальное значение вакуумметрического давления, равное -0,060 МПа;  $P_{\text{вак1}}$  – конечное значение вакуумметрического давления, равное -0,054 МПа;  $V_k$  – объем вакуумной камеры прибора, равный 240  $\text{см}^3$ .

Воздухопроницаемость определяется по формуле:

$$a = 1/m \quad (4)$$

Марка бетона по водонепроницаемости определяется по вычисленным параметрам  $a$  и  $m$  таблице Д.2 ГОСТ 12730.5. За результат испытаний по методу «по воздухопроницаемости» принимают среднее арифметическое значение сопротивления бетона воздуху комплекта, состоящего из 6-ти штук образцов.

В России применяются и другие методы испытаний бетона на водонепроницаемость [5-7], а также методы, приведенные в патентах на изобретения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе всех имеющихся методов по определению водонепроницаемости лежит теория проницаемости (фильтрации) через пористые среды. В подтверждении этого рассмотрим

течение жидкости, которое описывается уравнением неразрывности (или условием неразрывности) в дифференциальной форме [8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (5)$$

где  $\rho = \rho(x, y, z, t)$  - плотность жидкости (или газа), кг/м<sup>3</sup>, а  $\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$  - вектор скорости жидкости (или газа) в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ , м/с.

Уравнение (5) представляет собой закон сохранения массы в элементарном объеме, т.е. связь пространственного изменения потока массы жидкости или газа и скорости изменения плотности со временем.

При малых давлениях, до 10 МПа, можно пользоваться линейным законом изменения плотности жидкости [7]:

$$\rho = \rho_0(1 + \beta_e(p - p_{атм})),$$

где  $p_{атм}$  - атмосферное давление, Па;  $\rho_0$  - плотность жидкости при нормальных условиях,  $\rho_0 = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $\beta_e$  - коэффициент объемного сжатия воды,  $\beta_e \sim 0,5 \cdot 10^{-9} \text{Па}^{-1}$ .

Поскольку при проведении испытаний на водонепроницаемость бетона максимальное давление, создаваемое установкой, составляет 2 МПа, то относительное изменение плотности воды при таком давлении  $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \sim 10^{-3}$ , то есть десятые доли процента.

Аналогично при таких малых давлениях по линейному закону будет меняться и пористость, т.е. объем пустого пространства, располагающегося между частицами бетона, или изменение пористости минерального скелета можно представить аналогичной зависимостью:

$$n = n_0(1 + \beta_c(p - p_{атм})),$$

где  $n_0$  - пористость в нормальных условиях при давлении  $P_0 = 10^5$  Па, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\beta_c$  - показатель удельного сжатия минерального скелета,  $\beta_c \sim (0,8 - 5) \cdot 10^{-11} \text{Па}^{-1}$ . При давлении до 2 МПа относительное изменение пустого объема, заполняемого жидкостью, будет порядка  $10^{-5}$ .

При малых давлениях (порядка 2 МПа), малых коэффициентах сжимаемости воды и коэффициентах сжатия минерального скелета, жидкость можно считать несжимаемой, т.е. считать ее плотность независимой от давления. Тогда, уравнение неразрывности (1) сводится к уравнению несжимаемости:

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0 \quad (6)$$

В разделе механики сплошных сред из уравнения Навье-Стокса, описывающего движение вязкой ньютоновской жидкости, при условии несжимаемости жидкости можно получить закон движения жидкости - так называемый закон Дарси в дифференциальной форме [7]:

$$\vec{v} = -\frac{K}{\eta} \nabla p, \quad (7)$$

где  $K$  - коэффициент проницаемости (фильтрации) среды, см/с;  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости, Па/с,  $p$  - давление, Па.

Рассмотрим частную задачу о потоке жидкости, который двигаясь через однородную пористую среду, за время  $t$  преодолел расстояние  $h$ . На входе в систему давление жидкости постоянно и равно  $p_0$ , на высоте  $h$  давление  $p=0$  (рисунок 2).

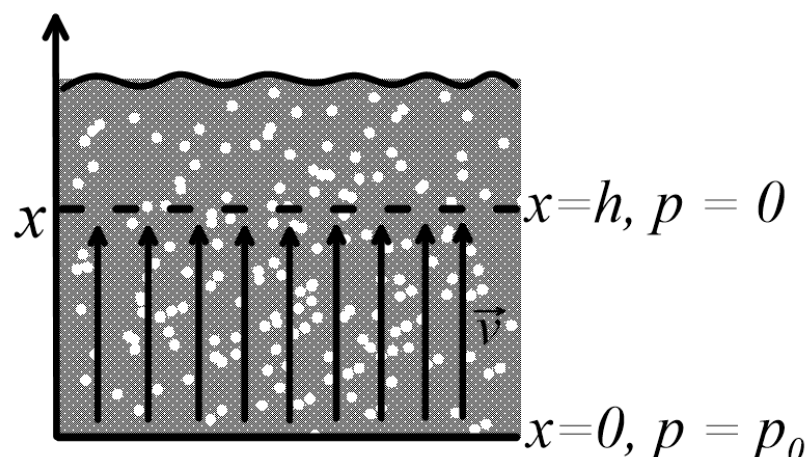


Рис. 2. Схема проникновения жидкости через пористое тело

В силу того, что характерная скорость движения жидкости сквозь среду мала (порядка 1 мкм/с), а времена движения большие, можно считать, что жидкость успевает равномерно заполнить поры, и поток ее является одномерным и стационарным:

$$\vec{v} = (v, 0, 0), v = const$$

Тогда закон Дарси (7) сводится к скалярному виду:

$$v = -\frac{K}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

Подставив его в уравнение несжимаемости (6) получим:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

Это уравнение является одномерным дифференциальным уравнением, имеющим решение вида:  $p = C_1 x + C_2$ . Определим неизвестные коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$ , используя граничные условия:  $p(0) = p_0$ ,  $p(h) = 0$ .

Получим уравнение для давления:

$$p = -\frac{p_0}{h} x + p_0 \quad (9)$$

Уравнение представляет (9) представляет собой уравнение (1), приведенное в качестве определения водонепроницаемости.

Подставив уравнение (9) в скалярный закон Дарси, получим уравнение для скорости жидкости:  $v = \frac{K p_0}{h \eta}$ .

Выражая коэффициент проницаемости среды  $K$ :

$$K = \frac{v h \eta}{p_0}$$

В действительности, измерению поддаются такие величины, как глубина проникновения жидкости  $h$ , см (или высота образца в случае, когда определяется факт достижения жидкостью противоположного торца) и время проникновения  $t$ , с давление закачки жидкости  $p_0$ , Па задается. Скорость потока жидкости является, фактически, отношением пути, прошедшим передним краем потока, ко времени ее движения, так что  $v = \frac{h}{t}$ , и можно получить первую рабочую формулу:

$$K = \frac{h^2 \eta}{p_0 t} \quad (10)$$

С другой стороны, если измерять объем жидкости, которая за время  $t$  протекла через образец, то скорость прокачки  $v = \frac{Q}{S t}$ , где  $Q$  – объем фильтрата,  $cm^3$  и  $S$  – площадь

поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>, можно получить формулу для измерения коэффициента фильтрации, соответствующую ГОСТ 12730.5-2018:

$$K = \frac{h\eta Q}{sp_0 t}. \quad (11)$$

Таким образом, формулы (9), (10) и (11) являются основой для экспериментального определения водонепроницаемости среды прямыми методами «мокрого пятна», «по глубине проникновения воды» и коэффициент фильтрации, соответственно. Аналитическая модель движения жидкости в пористой среде базируется на линейном законе Дарси для вязкой ньютоновской жидкости и уравнении неразрывности потока. В таблице 1 приведены основные формулы определения водонепроницаемости прямыми и косвенными методами по ГОСТ 12730.5.

Таблица 1. Основные расчетные формулы для определения водонепроницаемости бетона по ГОСТ 12730.5-2018

Метод испытаний на водонепроницаемость по ГОСТ 12730.5-2018	Измеряемая/ расчетная характеристика	Единицы измерений	Основная расчетная формула метода
«Мокрое пятно»	Избыточное давление воды	Па	$p = -\frac{p_0}{h}x + p_0$
«Глубина проникновения воды под давлением»	Глубина проникновения воды в образце	см	$h = \sqrt{Kp_0 t / \eta}$
Коэффициент фильтрации	Коэффициент фильтрации	см/с	$K = \frac{h\eta Q}{Sp_0 t}$
«По воздухопроницаемости»	Сопrotивление материала проникновению воздуха	с/см <sup>3</sup>	$m = \frac{\Delta t}{0,423 \ln \left( \frac{P_{\text{вак0}}}{P_{\text{вак1}}} \right) V k}$

Указанные методы оценки водонепроницаемости бетонов обладают определенными недостатками. Так, в методе «мокрого пятна» неудовлетворительно осуществляется учет толщины бетона. При определении водонепроницаемости для перехода от одной рабочей толщины к другой толщине предложено применять относительный показатель давления по толщине бетона, являющийся частным от деления, удерживаемого образцом максимального давления на его толщину [10]. Недостаток метода «коэффициента фильтрации» как характеристики водонепроницаемости состоит в корреляции при переходе к реальному гидростатическому давлению. Кроме того, все методы испытаний не учитывают капиллярное давление, которое возникает при проникновении воды в толщу бетона, что дает погрешность на марку.

При формировании и последующем твердении бетона в его объеме образуется поровое пространство. Пористость обусловлена многочисленными физико-механическими и химическими изменениями, происходящими в структуре затвердевшего бетона в зависимости от минерального состава, дисперсности цемента, В/Ц-отношения, соотношения составляющих бетона, формы и гранулометрии заполнителя, технологии приготовления бетонной смеси и условий ее отвердевания. В зависимости от распределения пор по радиусам в бетоне, перепада давления, индивидуальных особенностей бетона и флюида может осуществляться тот или иной механизм переноса жидкости. Для бетонов, имеющих капилляры диаметром в пределах 10<sup>-7</sup>-10<sup>-2</sup> см, возможны три механизма переноса: вязкостное (пуазейлевское) течение, капиллярный перенос и диффузионный перенос, подчиняющийся закону Фика. В таблице 2 на основании экспериментальных данных дается дифференциация механизмов переноса

воды через бетон в зависимости от коэффициента проницаемости и минимального радиуса пор [11].

Таблица 2. Механизм переноса жидкости, коэффициент проницаемости и размер радиусов максимальных пор

Механизм переноса жидкости	Коэффициент проницаемости, $\text{см}^3 \cdot \text{см} / \text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ат}^*$	Размер радиусов максимальных пор, см
Молекулярная диффузия	$< 10^{-7}$	$< 10^{-5}$
Капиллярный поток	$10^{-7} - 10^{-4}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Вязкостный поток (ламинарный с возможным переходом в турбулентную область)	$> 10^{-5} - 10^{-4}$	$> 10^{-4} - 10^{-3}$
ат* - техническая атмосфера		

Большинство составов бетонов имеет минимальные размеры капилляров преимущественно с радиусом  $10^{-3}$  см и менее, поэтому механизм переноса жидкости определяется в основном процессом капиллярного переноса. Ю.В. Чеховский отмечает: «при соприкосновении жидкости с поверхностью бетона на продвижение жидкости в глубь тела будут оказывать влияние две силы: перепад давления  $\Delta P$  и капиллярное давление  $P_\sigma$ . По мере продвижения жидкости возрастает сопротивление  $P_\tau$ , возникающее от трения жидкости о стенки капилляров. По достижению жидкостью обратной поверхности тела капиллярные силы, меняют знак направления. Если ранее капиллярные силы принимали активное участие в продвижении жидкости, то теперь оказывают сопротивление, равное величине капиллярного давления. При этом если  $\Delta P > P_\sigma + P_\tau$ , то течение жидкости будет происходить по закону Пуазейля. Если  $\Delta P \leq P_\sigma + P_\tau$ , то перенос жидкости осуществляется посредством капиллярного переноса» [11].

Поэтому можно сказать, что микрокапилляры – водонепроницаемы, идеальные капилляры – абсолютно водопроницаемы, а макрокапилляры цементного камня – мало- или ограниченно водопроницаемы, т.к. к их центру поверхностные силы ослабевают, но пленки воды, удерживаемые ими затрудняют продвижение по центру капиллярного канала.

Следовательно, причину торможения перемещения воды в поровой матрице бетона можно свести к явлению вязкого трения воды при ее движении в тонких проницаемых капиллярах. Таким образом, водонепроницаемость цементного бетона определяется водонепроницаемостью системы «сквозных» макрокапиллярных пор [4].

В научной литературе сделано множество попыток определить взаимосвязь показателей водонепроницаемости и поровой структуры бетонов. Проведены исследования взаимосвязи водонепроницаемости и показателей среднего радиуса «эффективных» пор в бетоне, общей и «сквозной» макрокапиллярной пористости. Однако, по причине отсутствия физической модели из взаимосвязи, преобладающая часть полученных математических зависимостей носит корреляционный характер. При смене состава бетона не гарантировала надежность.

## ВЫВОДЫ

Теоретической основой методов определения водонепроницаемости бетона, изложенных в ГОСТ 12730.5-2018, является аналитическая модель, базирующаяся на уравнении движения жидкости при условии несжимаемости воды и несжимаемости пористой среды при давлениях менее 10 МПа (уравнение неразрывности потока) и на линейном законе Дарси. Полученные рабочие формулы согласуются с условиями проведения испытаний и формулами расчета водонепроницаемости ГОСТ 12730.5. Однако, поскольку водонепроницаемость бетона определяется водонепроницаемостью системы «сквозных» макрокапиллярных пор, модель не в полной мере соответствует действительному

процессу проницаемости. Соответственно, расчетные формулы, результаты испытаний определения водонепроницаемости носят приблизительный характер.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия инновационного развития строительной отрасли Российской Федерации до 2030 г. [https://stroim.mos.ru/uploads/user\\_files/fies/str\\_2030.pdf](https://stroim.mos.ru/uploads/user_files/fies/str_2030.pdf) Дата обращения: 26.11.22.
2. Справочник по химии цемента / Ю.М. Бутт, Б.В. Волконский, Г.Б. Егоров и др. под ред. Б.В. Волконского и Л.Г. Судакаса. – Л.: Стройиздат, 1980. – 224 с.
3. *Вербецкий Г.П.* Прочность и долговечность бетона в водной среде /Г.П. Вербецкий. – М.: Стройиздат, 1976. – 128 с.
4. *Королев А.С.* Управление водонепроницаемостью цементных композитов путем направленного уплотнения гидратной структуры цементного камня: монография / А.С. Королев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 148 с.
5. *Антоян А.А.* О некоторых особенностях методов определения водонепроницаемости бетона. // Технологии бетонов. – 2017. - № 9-10.
6. *Закорименный А.И.* Сравнение результатов водонепроницаемости бетона подземных сооружений в натуральных условиях, получаемых с использованием прямых и косвенных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 282-294.
7. *Болотских О.Н.* Европейские методы физико-механических испытаний бетона. – Харьков: Колорит, 2010, – 144 с.
8. *Винников В.А, Каркашадзе Г.Г.* Гидромеханика: Учебник для вузов.-М.: Изд-во МГТУ.-2003-302 с.
9. *Горбунов Г.И.* Основы строительного материаловедения (состав, химические связи, структура и свойства строительных материалов). М.: Изд-во АСВ, 2002.-168 с.
10. Рекомендации по испытаниям растворов и бетонов для тонкостенных конструкций на водонепроницаемость. – М.: Стройиздат, 1969. -25 с.
11. *Чеховский Ю.В.* Понижение проницаемости бетона. Москва: Изд-во Энергия, 1968.-191 с.