



eISSN 2311-2468
Том 8, № 3. 2020
Vol. 8, no. 3. 2020

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



БОРИСОВ М. П., ВАВИН А. А., УТКИНА В. Н.

**СОВРЕМЕННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ REVIT И Renga
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ**

Аннотация. Выполнено сравнение современных автоматизированных систем Autodesk Revit и Renga для информационного моделирования зданий. Определены преимущества и недостатки этих систем.

Ключевые слова: информационное моделирование зданий, автоматизированные системы, Autodesk Revit, Renga, преимущества, недостатки.

BORISOV M. P., VAVIN A. A., UTKINA V. N.

**MODERN AUTOMATED SYSTEMS REVIT AND Renga
FOR BUILDING INFORMATION MODELING**

Abstract. A comparative analysis of modern automated systems Autodesk Revit and Renga for building information modeling is carried out. The benefits and drawbacks of these systems are revealed.

Keywords: building information modeling, automated system, Autodesk Revit, Renga, benefits, drawbacks.

Одним из инновационных трендов в мировой строительной отрасли является информационное моделирование зданий (BIM). Это принципиально иной подход к проектированию, возведению, оснащению, обеспечению эксплуатации и ремонту здания, к управлению всем жизненным циклом объекта, включая и его экономическую составляющую. Такая технология имеет ряд преимуществ: значительное повышение качества работы и наименьший шанс возникновения ошибок, наиболее наглядное представление проекта по сравнению с простой проработкой чертежей, снижение экономических затрат и временных ресурсов. Актуальность данного подхода неоспорима и требует дальнейшего изучения для внедрения и широкого использования [1–4].

Технология BIM предполагает, прежде всего, сбор, хранение и полную обработку на этапах проектирования всей архитектурной, конструкторской, технологической, экономической информации о здании, включая взаимосвязи и зависимости, позволяет фактически создавать виртуальный дубликат здания. Над информационной моделью работают одновременно представители различных отраслей строительства (архитекторы, технологи, конструктора, дизайнеры), принимая оптимальные и эффективные решения.

Сегодня на российском рынке существует много различных автоматизированных систем и программных комплексов для BIM-проектирования, обладающих своими

отличительными возможностями. Следует отметить, что ведущие платформы, в основном, являются иностранными. По результатам проведенных исследований «Уровень применения BIM в России 2019», представленных в отчете [5], самыми популярными в строительных организациях являются Autodesk Revit, ArchiCAD, Tekla Structures и Renga. Впервые российская BIM-платформа Renga вошла в первую четверку применяемого программного обеспечения в стране.

В данной статье рассмотрены подробнее системы автоматизированного проектирования Autodesk Revit и Renga, которые достаточно полно реализуют основные подходы технологии информационного моделирования.

Autodesk Revit, или просто Revit – это высокотехнологичный программный комплекс, предназначенный для реализации основ информационного моделирования зданий для проектировщиков и архитекторов, разработанный компанией Autodesk (США). В этом комплексе, в полной мере, реализована возможность трехмерного проектирования и моделирования элементов здания, а также построения индивидуальных и сложных объектов, возможность совместной работы над проектом, начиная от идеи и завершая выпуском рабочей документации и спецификаций [6].

Компания Autodesk выпустила три версии Revit для разных задач проектирования зданий: Revit Architecture – для архитекторов и дизайнеров; Revit Structure – для разработки несущих конструкций; Revit MEP – для разработки решения инженерных систем электроснабжения, вентиляции и водоснабжения. Возможность 3D-моделирования позволяет воплощать индивидуальные идеи каждого (см. рис. 1).



Рис. 1. Реализация трехмерного моделирования здания в Revit Architecture.

База данных Revit содержит всю необходимую информацию о проекте на разных этапах проектирования здания, от разработки концепции до строительства и его демонтажа. Трехмерная модель здания делится на рабочие плоскости, что дает возможность рассмотреть все важные конструктивные элементы (фундаменты, колонны, стены, перекрытия). Все составляющие детали доступны в семействах, которые загружаются из стандартных библиотек [4]. Также есть возможность разработки пользовательских семейств и их распространение. На примере трехмерной модели доступно изучение влияния разных элементов сооружения на наглядность перспективного изображения (см. рис. 2).



Рис. 2. 3D-модель конструктивной системы здания в Revit Structure.

Изучив функционал Revit, позволяющий выполнение согласованного и совершенного моделирования, были выявлены бесспорные преимущества: реализация плоского и трехмерного моделирования, а также зависимость с рабочей документацией; стандартная база семейств, которая включает в себя готовые объекты от стен и блоков, до светильников и декора; возможность добавлять в семейства разработанные индивидуальные объекты; возможность расчета арматуры в железобетонных конструкциях и подбор арматуры в соответствии с расчетами.

На фоне преимуществ также были выявлены и недостатки: диспетчер проектов не интуитивный, он включает в себя все основные и побочные создаваемые виды; нет возможности построения плоскостей, графические примитивы отсутствуют (не включая линии и дуги, образующие контур); не реализована возможность разработки чертежей в пространстве модели. Существенным недостатком данного комплекса является его высокая

стоимость, и для многих строительных компаний нашей страны приобретение его становится непреодолимой преградой на пути внедрения BIM.

Российская компания Renga Software вместе с АСКОН и «1С» разработала базовые продукты для проектирования и информационного моделирования зданий, сооружений: Renga Architecture – для архитектурно-строительного проектирования; Renga Structure – для конструктивной составляющей зданий и сооружений (металлические и железобетонные конструкции); Renga MEP – для проектирования инженерных систем зданий. Платформа Renga предоставляет возможность совмещения свободного моделирования с объектным представлением конструктивных элементов; позволяет реализовать архитектурные решения здания и сооружения, придать полноценный индивидуальный внешний вид объекту, осуществить проектирование здания любой сложности. Реализация трехмерного моделирования и взаимодействие систем показаны на рис. 3.

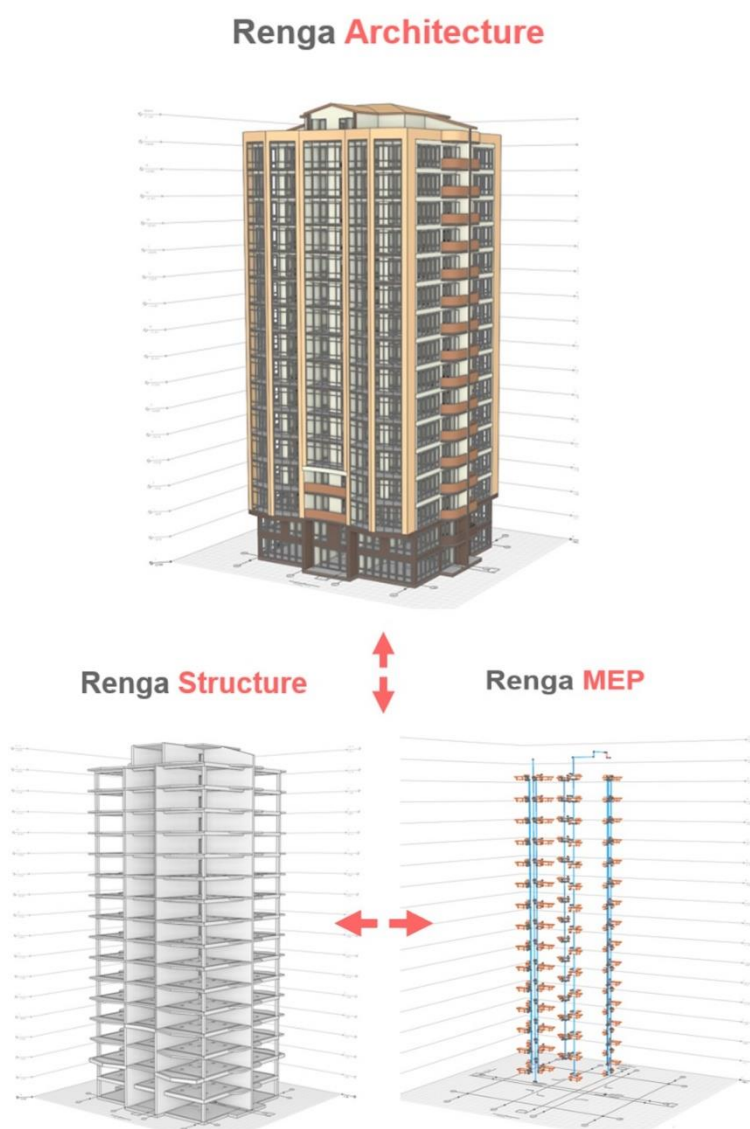


Рис. 3. Реализация трехмерного моделирования в САПР Renga.

Во время работы в режиме плоского проектирования (вид в плане) предоставляется возможность разработки трехмерной модели в неограниченном пространстве, начиная с подготовки рабочей поверхности, затем выстраивания осевых линий и установки высотных отметок уровней. Создание осей реализовано различными способами (прямая по двум точкам, дуга по трем точкам и так далее), переход от одного к другому выполняется во время построения оси. Параметры оси устанавливаются в динамических переменных (размер, угол наклона и другие), их изменение возможно через свойства элемента. В Renga реализовано формирование элементов для 3D-проектирования с удобным перечнем возможностей. Все документирование формируется в программе и соответствует нормативной базе, используемой в России.

Преимущества программного комплекса Renga: возможность одновременного плоского и трехмерного моделирования, в котором очень удобно и достаточно легко ориентироваться; навигация по интерфейсу достаточно легкая и удобная, она в различных вариантах, непосредственно через 3D-модель или, используя режим «Обозреватель проекта». Из недостатков было выявлено следующее: не реализована возможность работы одновременно в нескольких видовых окнах; нет вывода спецификаций, связанных с моделью; при документировании проекта не вся доступная информация переходит на лист (построение осей, размеров для каждого вида элементов); нет модулей для работы с конструкциями. Полученные результаты сохраняются в различных форматах (ifc, dxf), что дает возможность использования информационной модели и данных на всех стадиях коллективной работы над проектом [7; 8]. BIM-система Renga требует меньше времени для освоения и значительно дешевле иностранных аналогов. Общая стоимость постоянной лицензии на данный момент составляет около 270 тыс. рублей. Для сравнения, только годовая лицензия Revit стоит 95 тыс. рублей на одно рабочее место.

В результате проведенной работы были подробно рассмотрены функциональные возможности автоматизированных систем проектирования Autodesk Revit и Renga, а также выявлены их преимущества и недостатки. Данные системы достаточно интуитивны и просты в изучении и использовании, предоставляют большие возможности реализации самых смелых творческих идей и постоянно развиваются. Они позволяют объединять независимое моделирование с объектным понятием конструктивных элементов, дают возможность быстро реализовать архитектурные решения здания и сооружения, придать ему полноценный и индивидуальный внешний вид, а также сделать сооружение прочным и безопасным, удобным для работы и жизни людей. Использование современных автоматизированных систем в проектных организациях позволит значительно ускорить внедрение новых

подходов к проектированию, а также обеспечить контроль над инвестиционно-строительным процессом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов В. В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 392 с.
2. Уткина В. Н., Смолин А. Н. Российский опыт применения BIM-технологий в строительном проектировании // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – С. 201 – 210.
3. Ошкина Л. М., Асташов А. М. Из опыта применения информационных технологий проектирования на архитектурно-строительном факультете Мордовского госуниверситета // Архитектура и экология: Материалы V Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Часть 2. – Киев: НАУ, 2013. – С. 27 – 29.
4. Джанибекова З. Н. Информационное многомерное моделирование объектов строительства [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2016. – №15. – С. 178 – 180. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/119/33045/> (дата обращения 25.01.2020).
5. Уровень применения BIM в России 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://concurator.ru/information/bim_report_2019/ (дата обращения 27.01.2020).
6. Ланцов А. Л. Revit 2010: Компьютерное проектирование зданий. Архитектура. Инженерные сети. Несущие конструкции. – М.: ФОЙЛИС, 2009. – 628 с.
7. Мовчан Д. А. Технология BIM для архитекторов. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 600 с.
8. Дубинин Д. А., Набок А. А., Харин В. А., Лаврентьева Л. М. Преимущества использования и развития отечественного BIM: система для трехмерного проектирования Renga [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». – 2017. – № 3. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_74_Dubinin_Nabok.pdf_1b900be9b4.pdf (дата обращения 25.02.2020).

УТКИНА В. Н., ГРЯЗНОВ С. Ю., БАБУШКИНА Д. Р.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ ВЫСОТНОГО ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК МОНОМАХ-САПР

Аннотация. В статье представлены результаты создания и МКЭ-расчета пространственной модели конструктивной системы высотного жилого комплекса в ПК МОНОМАХ-САПР. Выполнено проектирование монолитных железобетонных плит перекрытий.

Ключевые слова: высотное здание, конструктивная система, плиты перекрытий, монолитный железобетон, МКЭ-расчет, конструирование, армирование, анализ.

UTKINA V. N., GRYAZNOV S. YU., BABUSHKINA D. R.

DESIGN OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLABS OF HIGH-RISE RESIDENTIAL COMPLEX BY USING PC MONOMAKH-CAD

Abstract. The article presents the results of the development and FEM-calculation of a spatial model of the structural system of a high-rise residential complex in the PC MONOMAKH-CAD. The design of monolithic reinforced concrete floor slabs was performed.

Keywords: high-rise building, structural system, floor slabs, monolithic reinforced concrete, FEM calculation, design, reinforcement, analysis.

С каждым днем заказчики ставят перед архитекторами и инженерами всё более сложные задачи проектирования и эффективного использования площадей возводимых высотных объектов. Пространства должны отвечать гибкостью на любые изменения конъюнктуры рынка. Однозначно самыми потенциальными с точки зрения гибкости пространства и многофункциональности являются здания и сооружения с монолитным железобетонным каркасом.

Основными вертикальными несущими элементами в такой системе являются колонны и ядра жёсткости, занимающие минимальные пространства в общем строительном объеме. Усилия в них распределяются равномерно за счет жесткого соединения с плитами перекрытий. Эта особенность совместной работы всех конструктивных элементов каркаса делает здания менее материалоемкими. Изгибающие моменты в пролетах плит снижаются, а соответственно уменьшается и расчетная площадь нижней рабочей арматуры, но появляется необходимость расположения дополнительной верхней арматуры над опорами, где из-за жесткого соединения возникают значительные моменты.

Кроме того, из эстетических соображений и для экономии пространства в жилых и общественных зданиях проектируются преимущественно безбалочные плиты перекрытий, которые опираются на колонны без капителей. Сами же колонны часто расположены в плане по нерегулярной сетке, поэтому получаются разные и, порой, значительные по величине расчетные пролеты. Плиты могут быть сложной формы и иметь множество отверстий.

Данные особенности монолитных железобетонных плит перекрытий требуют повышенного внимания к расчету (в частности, на продавливание колоннами), конструированию и армированию [1; 2].

Первым и самым важным этапом в современном проектировании является создание многомерной информационной модели объекта. От того насколько точно и грамотно будет составлена модель, зависят все последующие этапы расчета и проектирования отдельных конструкций. В ней должны быть отражены основные технологические, конструктивные и объемно-планировочные решения проектируемого объекта, а также максимально точно определены и назначены нагрузки и воздействия, которым он будет подвержен в процессе и по окончании строительства. Все эти нюансы расчетов требуют огромных вычислительных и функциональных возможностей современных программных комплексов.

Технологии не стоят на месте, постоянно совершенствуются, выводя работу проектировщиков на совершенно иной уровень. В первую очередь, стоит упомянуть технологии информационного моделирования, с помощью которых процесс создания самых сложных и уникальных объектов значительно упрощается [3].

Одним из программных комплексов, поддерживающих концепцию BIM, является ПК МОНОМАХ-САПР. Его успешно применяют при создании пространственной модели и расчете железобетонных каркасно-монолитных высотных зданий. Различные этапы проектирования и расчета конструкций, выполняемые с помощью отдельных программ, в МОНОМАХ-САПР объединены в рамках общего комплексного подхода [4; 5].

Цель данной работы заключалась в проектировании монолитных железобетонных плит перекрытий с учетом взаимодействия всех несущих конструктивных элементов высотного жилого комплекса и основания в программном комплексе МОНОМАХ-САПР. Объектом исследования был выбран строящийся в настоящее время 25-ти этажный жилой комплекс с 2-х этажной стилобатной частью и 2-мя подземными этажами в г. Москва. Комплекс возводится в уже сложившейся ранее застройке. Здание имеет сложную в плане конфигурацию, максимальные размеры в осях (в уровне стилобата) 97,045×79,300 м. Высота комплекса от планировочной отметки земли до наивысшей отметки конструктивного элемента составляет 99,55 м (см. рис. 1).

Архитектурные и объемно-планировочные решения, а также результаты инженерно-геологических изысканий были приняты из реального проекта. В конструктивные решения были внесены необходимые изменения с учетом требований сводов правил [6–10].



Рис. 1. Проектируемый жилой комплекс.

Архитектурные и объемно-планировочные решения объекта. На отметке -9,900 м размещаются помещения: стоянки для автомобилей, насосной станции, слаботочных систем, радиоузла, лифтового холла, хранения аварийного запаса воды. На отметке -5,200 м размещаются помещения: супермаркета, разгрузочных торгового центра, ramпы, универсальной кабины для маломобильных групп населения. Первым жилым этажом комплекса является 4-ый этаж. На жилых этажах располагаются квартиры различной планировки: студии, одно-, двух-, трехкомнатные классического и евро формата. Кровля стилобата на отметке +10,550 м эксплуатируемая. На кровле размещаются детская площадка и площадка для занятия физкультурой. Начиная с 16-го жилого этажа, форма башни изменяется. Она поворачивается относительно нижележащих этажей, становится прямоугольной в плане и уменьшается в сечении. Высота этажей: -2-го этажа – 4,7 м; -1-го этажа – 5,2 м; 1-го и 2-го – 5,1 м; 3-го и выше – 3,5 м. Высотная часть комплекса построена вокруг центрального ядра жесткости – незадымляемого лестнично-лифтового узла.

Основные характеристики объекта: степень огнестойкости – I; уровень ответственности – II; класс конструктивной пожарной опасности здания – CO; класс функциональной пожарной опасности здания – Ф1.3, Ф3.1, Ф3.2, Ф4.3, Ф5.2. Здание

оборудовано всеми необходимыми современными инженерными системами в соответствии с СП 267.1325800.2016 [6].

Конструктивные решения объекта. Конструктивная схема здания представляет собой каркас из монолитного железобетона. Фундамент здания запроектирован в виде сплошной монолитной железобетонной плиты толщиной 2500 мм из тяжелого бетона класса В40. Плиты перекрытий – монолитные железобетонные из бетона класса В40. Стены здания – монолитные железобетонные толщиной 250 и 300 мм, материал – бетон В35. Колонны с отметки 0,000 м до отметки +10,050 м – монолитные железобетонные сечением 600×600 мм, 800×800 мм и круглые диаметром 900 мм из тяжелого бетона В60. Колонны с отметки +10,050 м до отметки +55,550 м – монолитные железобетонные сечением 500×800 мм, 700×700 мм и круглые диаметром 700 мм из тяжелого бетона В60. Колонны с отметки выше +55,550 м – монолитные железобетонные сечением 500×500 мм, 500×600 мм и круглые диаметром 600 мм из тяжелого бетона В40. Стены лестнично-лифтовых блоков (ядра) монолитные железобетонные толщиной 250 и 300 мм из тяжелого бетона В60. Арматура рабочая класса А500С по ГОСТ Р 52544-2006 принята для всех несущих конструкций здания.

На основании исходных данных была сформирована пространственная модель монолитного железобетонного каркаса высотного жилого комплекса в программе КОМПОНОВКА ПК МОНОМАХ-САПР (см. рис. 2, 3); создана модель грунта в программе ГРУНТ; произведен линейный и нелинейный МКЭ-расчет.

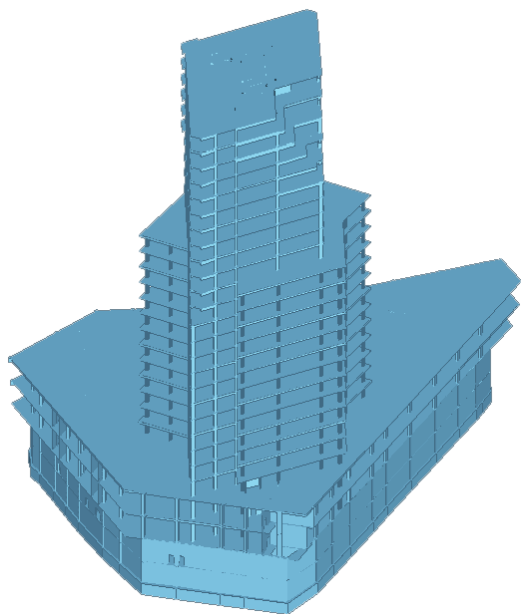


Рис. 2. 3D-модель здания.

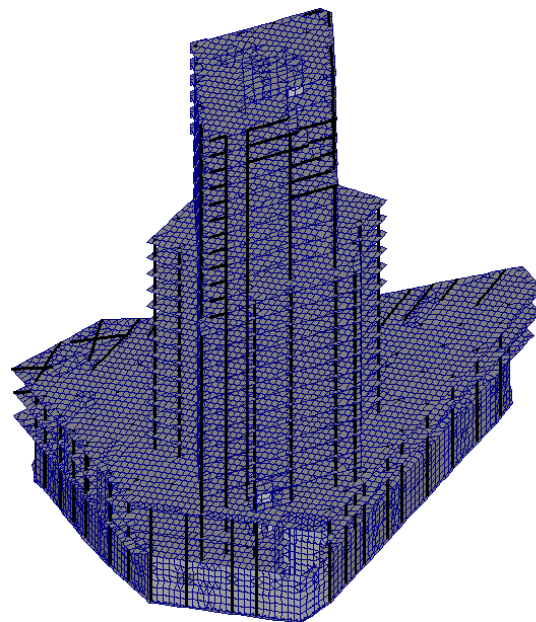


Рис. 3. Конечно-элементная схема здания.

Сравнение некоторых результатов общего расчета конструктивной системы здания с нормативными значениями приведены в таблице.

Таблица

**Сравнение расчетных параметров конструктивной системы
с допустимыми значениями**

Параметр	Полученное значение (линейный расчет)	Полученное значение (нелинейный расчет)	Предельно допустимое значение	Наименование источника
1	2	3	4	5
Горизонтальное перемещение верха конструкции по X, см	2,68	2,92	20,06	СП 267.1325800.2016; п. 8.2.4.15
Горизонтальное перемещение верха конструкции по Y, см	3,70	3,20	20,06	СП 267.1325800.2016; п. 8.2.4.15
Перекося этажей, см	0,17	0,2	1,27	СП 267.1325800.2016; п. 8.2.4.16
Прогиб плиты перекрытия 1-го этажа, см	0,65	1,70	4,72	СП 20.13330.2016, приложение Д, таблица Д.1 ($l = 10,7$ м)
Прогиб плиты перекрытия 11-го этажа, см	0,40	0,85	4,10	СП 20.13330.2016, приложение Д, таблица Д.1 ($l = 9$ м)
Средняя осадка фундамента, см	7,11	7,46	15	СП 22.13330.2016, приложение Г, таблица Г.1
Относительная разность осадок фундамента	0,001	0,002	0,003	СП 22.13330.2016, приложение Г, таблица Г.1

Максимальные значения расчетных параметров меньше предельно допустимых, определенных по нормативным документам [6; 7; 9]. Конструктивная система обеспечивает прочность, устойчивость и пространственную неизменяемость высотного здания.

Расчет плит перекрытий. Модель, импортированная из программы КОМПОНОВКА в программу ПЛИТА после выполнения МКЭ-расчета, позволяет исследовать работу плиты с учетом перемещений опор и взаимодействия всех несущих конструкций здания.

Рассмотрим плиту перекрытия 1-го этажа толщиной 300 мм. В программе ПЛИТА автоматически формируется расчетная конечно-элементная схема с учетом заданного шага триангуляции – 50 см. По результатам расчета определяются: значения оптимальной толщины плиты, перемещений, изгибающих моментов M_x (см. рис. 4) и M_y , поперечных сил Q_x и Q_y , площади верхнего (см. рис. 5) и нижнего армирования. Максимальные положительные изгибающие моменты возникают в пролетах между колоннами и стенами.

Они меняют свой знак, приближаясь к опорам, что является характерным для работы монолитных плит перекрытий. Наиболее напряженными являются приопорные зоны, здесь моменты и поперечные силы имеют наибольшие значения. Изополя армирования соответствуют изменению изгибающих моментов.

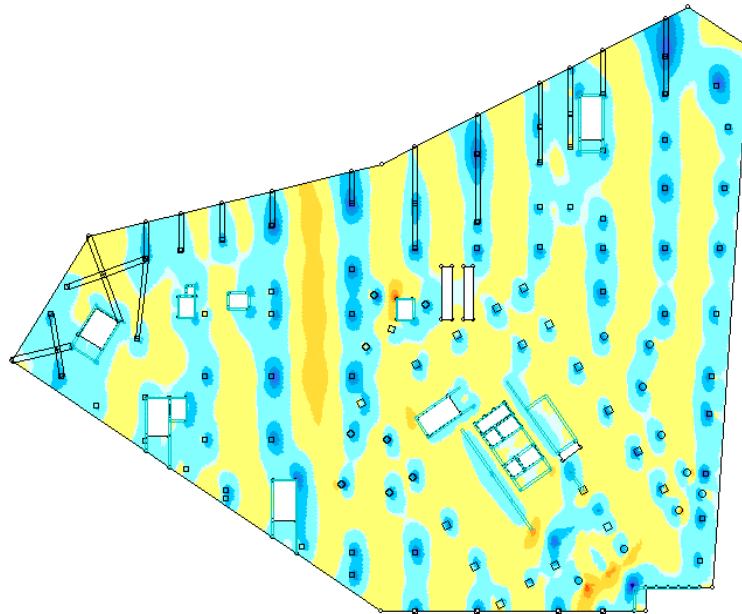
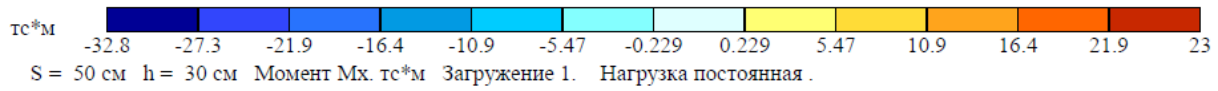


Рис. 4. Изополя изгибающих моментов M_x , тс*м .

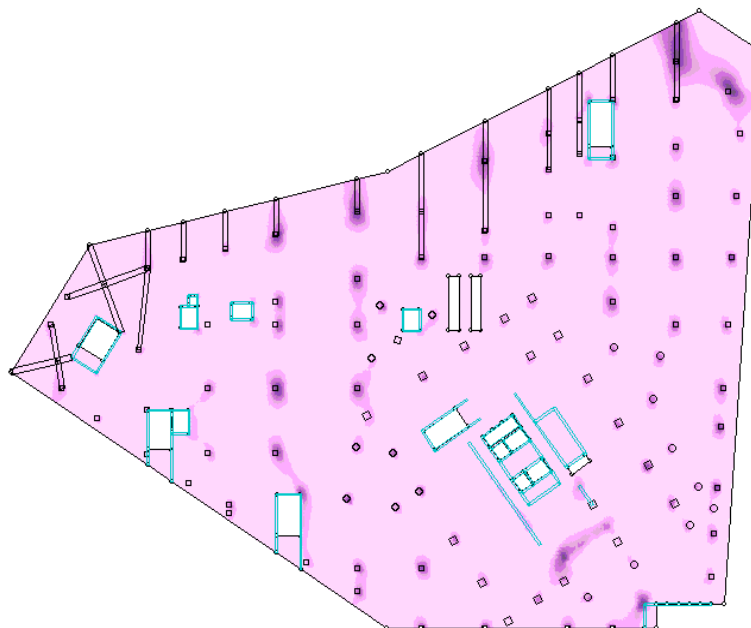
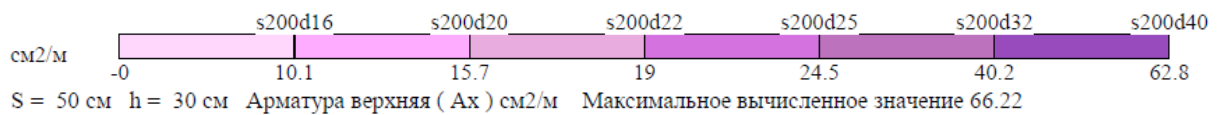


Рис. 5. Изополя верхнего армирования плиты вдоль оси X, $\text{см}^2/\text{м}$.

На основании проведенного расчета выполняем конструирование плиты. Принимаем фоновую рабочую арматуру нижней грани плиты диаметром 22 мм класса А500С с шагом 200 мм в обоих направлениях, для верхней грани – диаметром 25 мм класса А500С с шагом 200 мм. Дополнительное армирование в зонах с повышенными значениями растягивающих усилий производится в полуавтоматическом режиме.

По аналогии рассчитываем плиту 11-го этажа толщиной 300 мм. Задаем шаг триангуляции 50 см и формируем конечно-элементную схему плиты. По результатам расчета определяются характеристики напряженно-деформированного состояния: перемещения, изгибающие моменты M_x (см. рис. 6) и M_y , поперечные сил Q_x и Q_y , а также площади верхнего (см. рис. 7) и нижнего армирования.

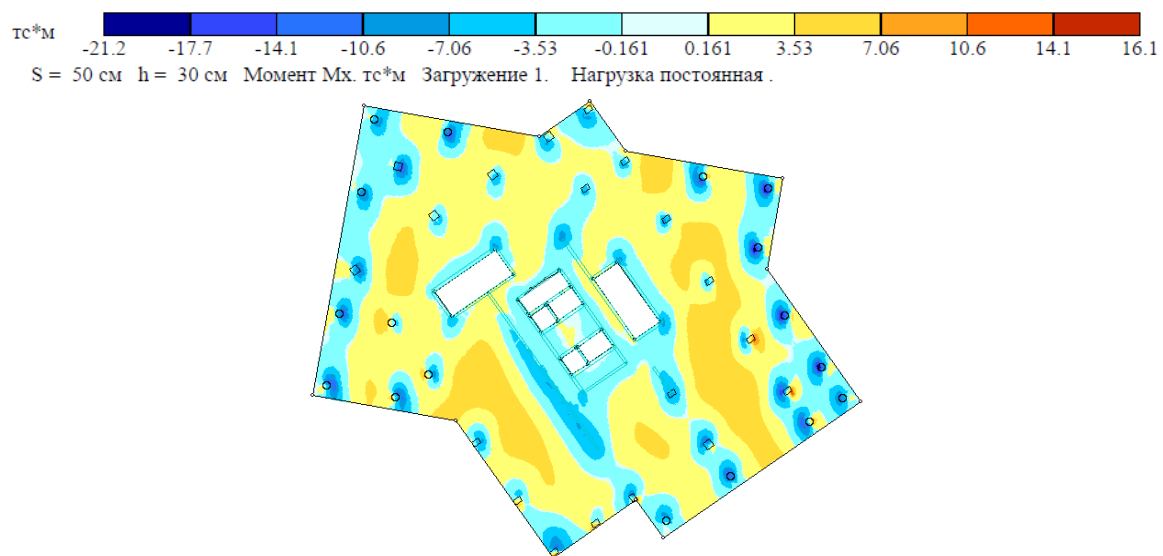


Рис. 6. Изополя изгибающих моментов M_x , тс*м.

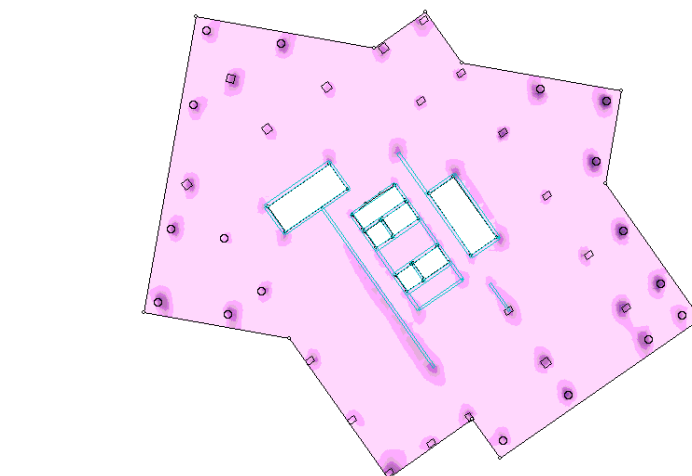
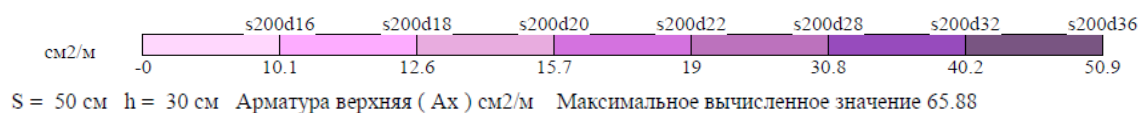


Рис. 7. Изополя верхнего армирования плиты вдоль оси X, см²/м.

Принимаем фоновую рабочую арматуру нижней грани плиты диаметром 18 мм класса А500С с шагом 200 мм в обоих направлениях, а рабочую арматуру верхней грани – диаметром 20 мм класса А500С с шагом 200 мм. Назначаем участки раскладки стержней дополнительной арматуры в необходимых местах плиты перекрытия. Чертежи, спецификации и ведомости расхода стали формируются автоматически.

Применение специализированного программного комплекса МОНОМАХ-САПР позволило создать пространственную модель конструктивной системы высотного жилого здания; выполнить необходимые расчеты фрагментированных плит перекрытий с учетом совместной работы всех несущих элементов здания и анализ результатов; произвести конструирование и армирование монолитных плит.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
2. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: АСВ, 2009. – 344 с.
3. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Проблемы и перспективы внедрения технологий информационного моделирования в области строительства в России // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвящ. 75-летию заслуженного деятеля науки РФ, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селяева В. П. 3-5 декабря 2019 г. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 408–413.
4. МОНОМАХ-САПР. Проектирование и расчет железобетонных и армокаменных конструкций многоэтажных зданий. LIRALAND Group официальный сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liraland.ru/mono> (дата обращения 02.02.2019).
5. Городецкий Д. А. МОНОМАХ-САПР 2013. Примеры расчета и проектирования: учеб. пособие, 2013. – 368 с.
6. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2016. – 122 с.
7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Минстрой России, 2016. – 228 с.

8. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Минстрой России, 2012. – 168 с.
9. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – М.: Минстрой России, 2016. – 104 с.
10. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2018. – 67 с.

ВОЛОДИН В. В., НИЗИНА Т. А., БАЛЫКОВ А. С.,

КОРОВКИН Д. И., КАРАБАНОВ М. О.

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ГЛИНИТОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МОДИФИЦИРОВАННОГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ¹**

Аннотация. Приведены результаты исследования прочностных характеристик (пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе) цементного камня с добавками термоактивированной глины Старошайговского месторождения Республики Мордовия. Установлена возможность повышения прочностных показателей цементных систем за счет оптимизации параметров обжига глины и дозировки модификатора.

Ключевые слова: цементный камень, минеральная добавка, пуццоланическая активность, термоактивированная глина, дозировка, параметры обжига, прочностные показатели.

VOLODIN V. V., NIZINA T. A., BALYKOV A. S.,

KOROVKIN D. I., KARABANOV M. O.

**THE EFFECT OF GLINITE ADDITIVES ON STRENGTH CHARACTERISTICS
OF MODIFIED CEMENT STONE ¹**

Abstract. The results of the study of the strength characteristics (tensile strengths under compression and tensile bending) of cement stone with the addition of thermally activated clay from the Staroshaigovsky deposit of the Republic of Mordovia are presented. The possibility of increasing the strength characteristics of cement systems by optimizing the parameters of clay firing and the dosage of the modifier is established.

Keywords: cement composites, mineral additive, pozzolanic activity, thermally activated clay, dosage, firing parameters, strength indicators.

В настоящее время одним из приоритетных направлений строительного материаловедения является разработка модифицированных цементных бетонов с высокими эксплуатационными свойствами, отличающихся сложным многокомпонентным составом с использованием индивидуальных и комплексных добавок разной природы и механизма действия – химических, минеральных, органоминеральных [1–4]. Применение модификаторов

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Мордовии № 18-43-130008 «Исследование влияния минеральных и органоминеральных добавок на основе термоактивированных полиминеральных глин и карбонатных пород на закономерности формирования структуры цементного камня и свойства высокопрочных мелкозернистых бетонов с заполнителем из отходов литейного производства».

стало ключом к решению многих технологических задач бетоноведения, в том числе к получению цементных композитов повышенной прочности ($60\div 100$ МПа и выше).

Одной из наиболее пуццоланически активных минеральных добавок для цементных бетонов является метакаолин [5]. Однако территориальная и количественная ограниченность каолинистых глин, высокая стоимость получаемого обогащённого сырья, растущие потребности в каолине бумажной и медицинской промышленностей обуславливают низкую степень применения метакаолина в цементной отрасли. В связи с этим актуальным направлением является разработка эффективных пуццолановых добавок для цементных систем на основе широко распространенных полиминеральных глин [6–7].

Исследования полиминеральных глин Республики Татарстан, Оренбургской и Челябинской областей [8–9] показали, что минеральные добавки, полученные на основе данных осадочных пород, отличаются повышенной физико-химической эффективностью в рецептуре цементных систем, не уступающей микрокремнезёму и метакаолину. В работе [10] установлено, что пуццолановой активностью после термической обработки обладают не только каолинистые, но и монтмориллонитовые, мусковитовые и иллитовые глины. Таким образом, полиминеральные глины, являющиеся повсеместно распространенным, доступным и дешевым материалом, представляют собой ценное сырьё для получения пуццоланов, что подтверждается результатами собственных исследований [11–14].

Целью данной работы являлось исследование влияния параметров обжига (температуры, длительности) и дозировки термоактивированной глины на прочностные характеристики цементного камня – пределы прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в возрасте 28 суток.

В рецептуре цементных систем основным компонентом вяжущего являлся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «Серебряковцемент». В качестве исходного сырья для получения минеральной добавки выбрана глина Старошайговского месторождения Республики Мордовия. Температура обжига глины составляла 400, 600 и 800°C, время обжига – 2, 3 и 4 часа. Прокалённые глины подвергались помолу в шаровой мельнице в течении 1 часа. Получаемые порошки вводились в состав цементного вяжущего в количестве от 2 до 18 % от массы портландцемента. Водотвёрдое отношение во всех составах принято постоянным – 0,3.

В ходе экспериментальных исследований было изучено изменение в зависимости от варьируемых факторов пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в возрасте 7 и 28 суток. По результатам проведенного анализа определены числовые значения коэффициентов полиномиальных зависимостей, описывающих изменение предела прочности

при сжатии (1) и на растяжение при изгибе (2) цементного камня в возрасте 28 суток от варьируемых рецептурно-технологических факторов:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{сж.}} = & 67,29 + 3,23 \cdot x_1 + 0,18 \cdot x_2 - 3,99 \cdot x_3 + 1,36 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,81 \cdot x_1 \cdot x_3 - \\ & -1,38 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,31 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 7,55 \cdot x_1^2 - 4,35 \cdot x_2^2 + 4,48 \cdot x_3^2 - \\ & -0,91 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 0,56 \cdot x_1 \cdot x_2^2 - 0,49 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 2,19 \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{раст.}} = & 10,11 + 0,62 \cdot x_1 - 2,06 \cdot x_2 - 0,57 \cdot x_3 - 0,49 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,19 \cdot x_1 \cdot x_3 + \\ & +0,14 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,09 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,57 \cdot x_1^2 + 0,43 \cdot x_2^2 + 0,12 \cdot x_3^2 + \\ & +2,47 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 0,19 \cdot x_1 \cdot x_2^2 + 0,23 \cdot x_1^2 \cdot x_3 - 0,36 \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где x_1 , x_2 – температура и время обжига глины соответственно; x_3 – дозировка добавки термоактивированной глины.

Уровни варьирования исследуемых факторов в натуральных и кодированных величинах приведены в таблице 1. С использованием уравнений (1) и (2) построены графические зависимости в виде изолиний изменения прочностных показателей цементного камня от исследуемых факторов (см. рис. 1).

Таблица 1

Исследуемые факторы и уровни их варьирования

Уровни варьирования в кодированных величинах	Варьируемые факторы		
	Температура обжига глины, °С	Время обжига глины, час.	Дозировка добавки термоактивированной глины, % от массы цемента
-2	–	–	2
-1	400	2	6
0	600	3	10
+1	800	4	14
+2	–	–	8

По результатам исследования установлена возможность получения модифицированного цементного камня с прочностью при сжатии в возрасте 28 суток не менее 75 МПа, что соответствует контрольному составу, даже при достаточно высоком содержании используемой минеральной добавки – 18% от массы портландцемента (см. рис. 1, в). При этом указанный уровень прочностной характеристики достигается в цементных системах с добавками полиминеральной глины, обожженной при температуре 600 °С в течение 2-3,5 часов.

Анализируя данные рис. 1 (а, в, д), выявлено падение прочностных показателей при сжатии модифицированного цементного камня при изменении температуры обжига глины с 600 до 800 или 400 °С. По сравнению с немодифицированным составом наиболее высокий прирост предела прочности при сжатии (более 20%) зафиксирован у цементных систем с содержанием минеральной добавки термоактивированной глины в количестве 2% от массы

портландцемента. При этом оптимальная длительность обжига глинистого сырья для всех температурных режимов близка к 3 часам.

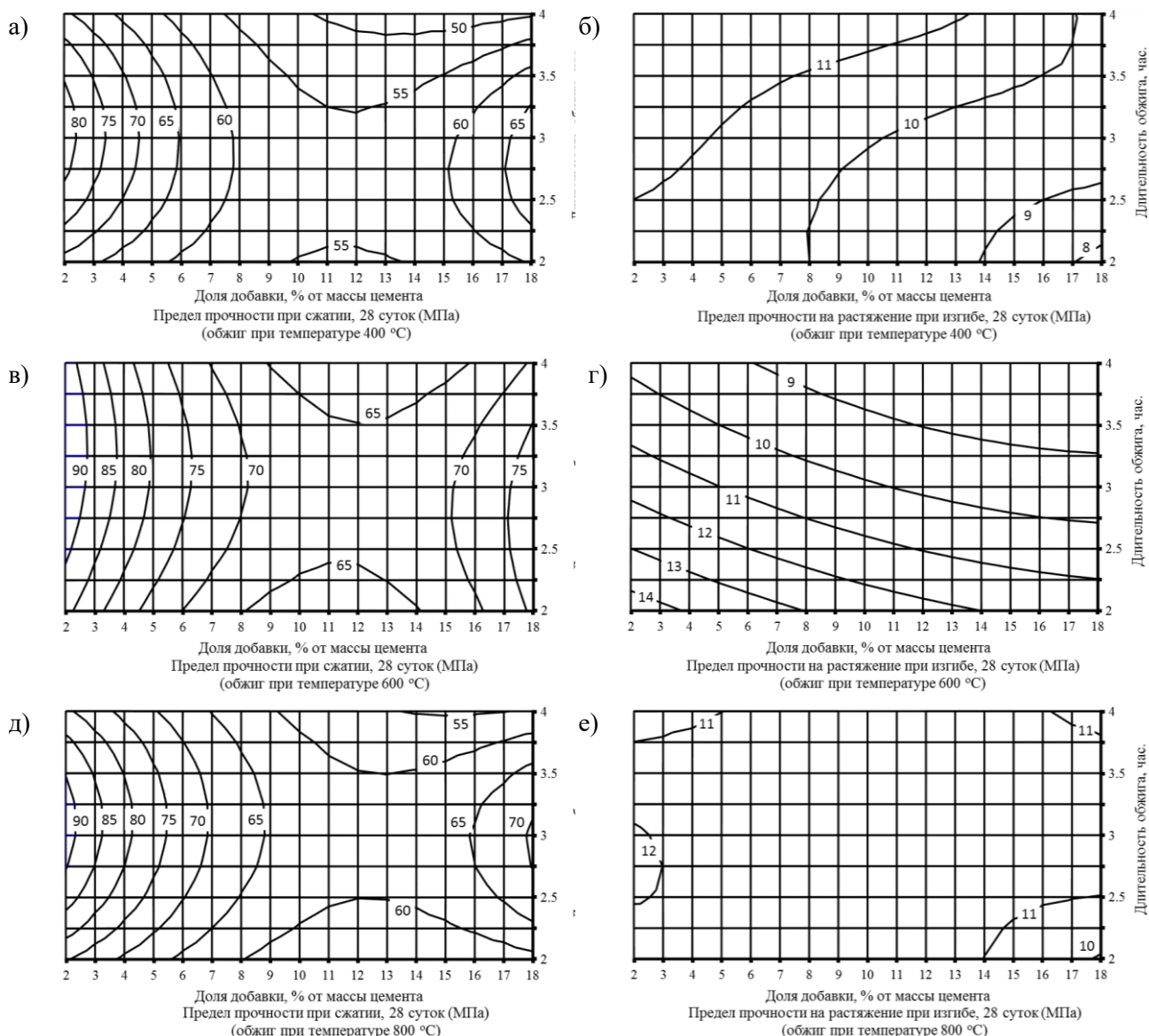


Рис. 1. Изменение предела прочности при сжатии (а, в, д) и на растяжение при изгибе (б, г, е) модифицированного цементного камня в возрасте 28 суток в зависимости от варьируемых факторов. Температура обжига: а, б – 400 °C; в, г – 600 °C; д, е – 800 °C.

Анализ кривых изменения предела прочности на растяжение при изгибе (см. рис. 1, б, г, е) показал, что наиболее высокие значения прочностных показателей модифицированного цементного камня в возрасте 28 суток (14 МПа и более) достигаются в составах с содержанием минеральной добавки термоактивированной глины в количестве 2-4% от массы портландцемента, при температуре и длительности обжига глинистого сырья – 600 °C и 2-2,2 часа соответственно. При этом изменение температуры термоактивации глины с 600 до 400 и 800 °C приводит к падению анализируемого прочностного показателя цементных систем. В то же время при увеличении температуры обжига с 400 до 800 °C достижение верхней границы

предела прочности на растяжение при изгибе цементного камня может быть обеспечено при снижении длительности термоактивации глинистого сырья с 4 до 2 часов.

Таким образом, по результатам экспериментального исследования установлена возможность получения модифицированного цементного камня, прочностные показатели которого не уступают контрольному составу без минеральной добавки, что свидетельствует о повышенной физико-химической эффективности модификаторов на основе глины Старошайговского месторождения. Полученные данные подтверждают перспективность и актуальность направления по разработке минеральных добавок для цементных систем на основе полиминеральных глин, что позволит расширить номенклатуру выпускаемых на сегодняшний день модификаторов за счёт более полного использования местной минеральной сырьевой базы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давидюк А. Н. Бетон в строительстве – новые вызовы и перспективы // Вестник НИЦ. Строительство. – 2017. – №12. – С. 5-13.
2. Калашников В. И., Тараканов О. В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. – 2017. – №1-2. – С. 62-67.
3. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Дондуков В. Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов // Строительные материалы. – №11. – 2017. – С. 4-10.
4. Низина Т. А., Балыков А. С., Макарова Л. В., Коровкин Д. И., Володин В. В. Исследование комплексов активных минеральных добавок и дисперсных волокон при разработке составов дисперсно-армированных модифицированных мелкозернистых бетонов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – 2017. – №20. – С. 230-240.
5. Кирсанова А. А., Крамар Л. Я. Органоминеральные модификаторы на основе метаксаолина для цементных бетонов // Строительные материалы. – 2013. – №10. – С. 54-56.
6. Schulze S. E., Pierkes R., Rickert J. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials // Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. – Beijing, China, 2015. – 693 p.
7. Castello L. R., Hernandez H.J.F., Scrivener K. L., Antonic M. Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials // Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». – Madrid. – 2011. – P. 117.

8. Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р., Гайфуллин А.Р. Влияние добавок в портландцемент прокаленной и молотой глины с содержанием 40% каолинита на прочность цементного камня // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – №2. – С. 131-133.
9. Гайфуллин А. Р., Рахимов Р. З., Рахимова Н. Р. Влияние добавок глинистов в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 7 (59). – С. 66-73.
10. Fernandez R., Martizena F., Scrivener K. L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite // Cement and Concrete Research. – 2011. – № 41. – P. 113-122.
11. Володин В.В. Низина Т. А., Балыков А. С., Коровкин Д. И., Козлятников И. С., Башкаев Д. С., Григорьева А. А. Опыт применения обожжённой глины в качестве минеральной добавки к цементным композитам // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. – 2018. – С. 36-42.
12. Володин В. В., Низина Т. А., Балыков А. С., Ошкина Л. М., Коровкин Д. И. Влияние добавок термоактивированной глины на прочность цементного камня [Электронный ресурс] // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». – 2019. – №5. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/vliyanie-dobavok-termoaktivirovannoj-gliny-na-prochnost-cementnogo-kamnya> (дата обращения 20.01.2020).
13. Низина Т. А., Володин В. В., Балыков А. С., Коровкин Д. И. Влияние добавок в портландцемент обожжённой глины на прочность цементного камня // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – №3 (40). – С. 58-68.
14. Володин В. В., Низина Т. А., Балыков А. С., Коровкин Д. И. Влияние минеральной добавки на основе термоактивированной глины на прочностные характеристики цементных композитов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2019. – № 6(39). – С. 284-290.

СМАКАЕВ Р. М., НИЗИНА Т. А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ DYNAMO STUDIO

Аннотация. В статье описан метод повышения эффективности разработки проектно-сметной документации с помощью продукта DYNAMO STUDIO от компании Autodesk. Представлены основные принципы и инструменты визуального программирования.

Ключевые слова: информационное моделирование, автоматизация, визуальное программирование, программный код, оператор, язык программирования, анализ.

SMAKAEV R. M., NIZINA T. A.

DESIGN AUTOMATION BY USING DYNAMO STUDIO VISUAL PROGRAMMING

Abstract. The article proposes a method for improving the development of design specifications and estimates by using DYNAMO STUDIO by the Autodesk company. The basic principles and tools of visual programming are described.

Keywords: information modeling, automation, visual programming, program code, instruction, programming language, analysis.

Программное обеспечение, реализующее технологии информационного моделирования в сфере строительства, с каждым годом все больше доказывает свою эффективность и все прочнее укореняется в проектно-строительном процессе [1]. Причиной тому является стабильный рост возможностей, оптимизация скорости обработки информации, расширение функционала программных комплексов. Данный процесс направлен на снижение трудозатрат всех этапов строительства: подготовки проектной документации, возведения и эксплуатации зданий. Пользователи таких популярных комплексов для проектирования, как ArchiCAD, AllPlan, Revit, Advance Steel, Tekla, на данный момент имеют огромный спектр интуитивных и полезных инструментов, позволяющих тонко настроить работу. При этом каждый элемент современных трехмерных объектов, помимо геометрии, содержит большое количество параметров, необходимых для вывода спецификаций, настройки отображения и расчета, что в свою очередь формирует громоздкую, насыщенную информацией модель [2]. Данный фактор порождает необходимость организации работы по структуризации и обработке полученной информации. К тому же, несмотря на обширный инструментарий пользователя, основное время специалиста любого профиля проектирования все-же занимают однотипные, многократно повторяющиеся процессы, которые не могут быть оптимизированы разработчиками ввиду более узкой направленности. Для автоматизации подобных задач на

программном уровне требуется привлечение высококвалифицированных программистов с детальной разработкой технического задания и четкой формулировкой ожидаемых результатов.

Одной из тенденций по решению вышеописанных проблем является применение системы Dynamo Studio, которая разрабатывается крупнейшим в мире поставщиком программного обеспечения для сферы строительства – Autodesk. Dynamo – среда визуального программирования с открытым программным кодом, специально адаптированная для проектировщиков. Главным назначением среды является создание новых функций программ, позволяющих анализировать большие массивы данных и оптимизировать рутинные процессы. На данный момент среда доступна в программных комплексах Civil 3D, Advance Steel, AutoCAD, однако наибольшее применение и распространение Dynamo получил именно в качестве дополнения к Autodesk Revit [3].

Запуск Dynamo осуществляется через одноименный инструмент панели инструментов *Визуальное программирование* вкладки *Управление* программного комплекса Revit (см. рис.1).

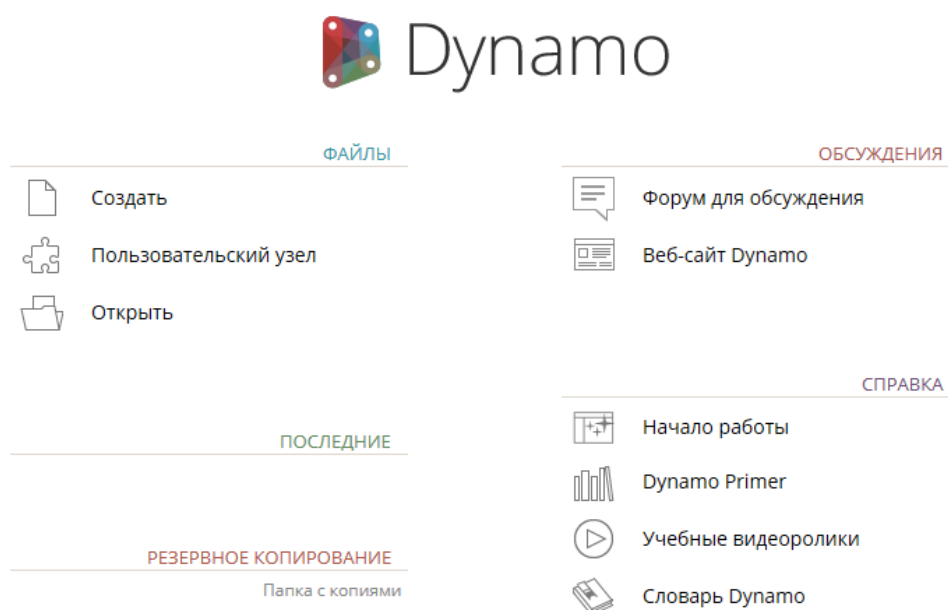


Рис. 1. Стартовый экран Dynamo.

Процесс визуального программирования среды Dynamo можно представить, как последовательный набор действий, выполняемых по заданному алгоритму [4]. Данный алгоритм выполняется с помощью предварительно разработанных текстовых фрагментов программного кода – нодов (с англ. node – «узел»), из которых собирается скрипт (программный код). Большинство базовых узлов являются операторами языка DesignScript, поэтому оформлены в виде прямоугольников с входными и выходными слотами (см. рис. 2).

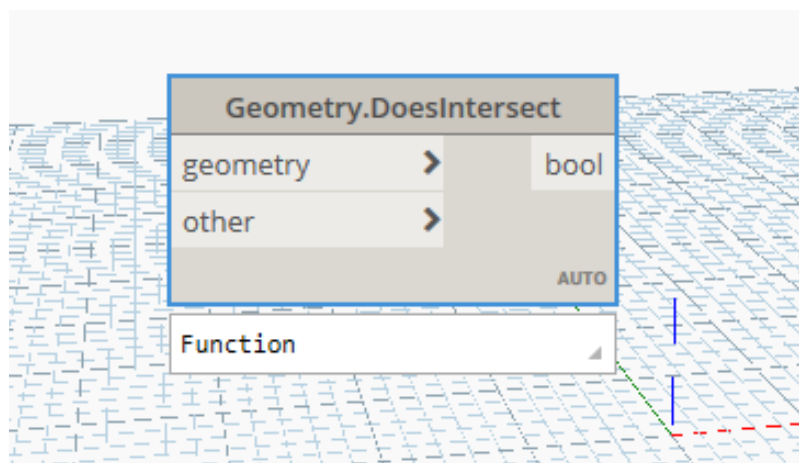


Рис. 2. Общий вид узла DesignScript.

В интерфейсе Dynamo доступ к узлам, сгруппированным по категориям и подкатегориям, осуществляется через библиотеку. Поиск узлов осуществляется через строку поиска, выдающую близкие результаты по библиотеке в реальном времени. Все узлы имеют текстовое описание на русском языке, отражающее выполняемую функцию (см. рис. 3).

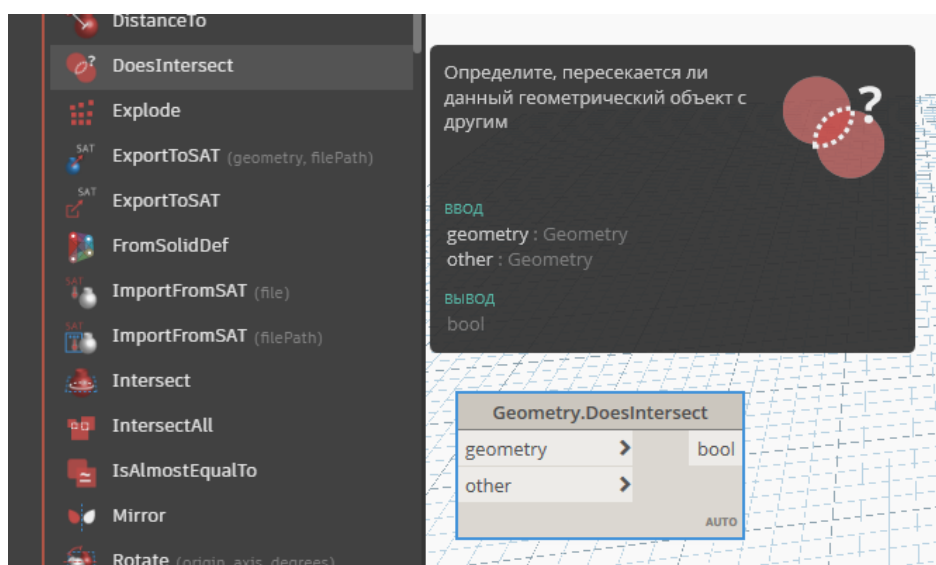


Рис. 3. Определение функции узла.

В то же время операторы можно записывать в текстовом кодовом поле универсального нода *Code Block*, который на основе введенной информации сформирует входной и выходной слоты. Огромным преимуществом Dynamo, открывающим колоссальные функциональные возможности, является возможность написания текстового кода на языке программирования IronPython (см. рис. 4). Узлы соединяются между собой с помощью связей, которые определяют последовательность действий, направленных на достижение определенного результата. Передача данных и порядок выполнения операций осуществляется слева направо (см. рис. 5).

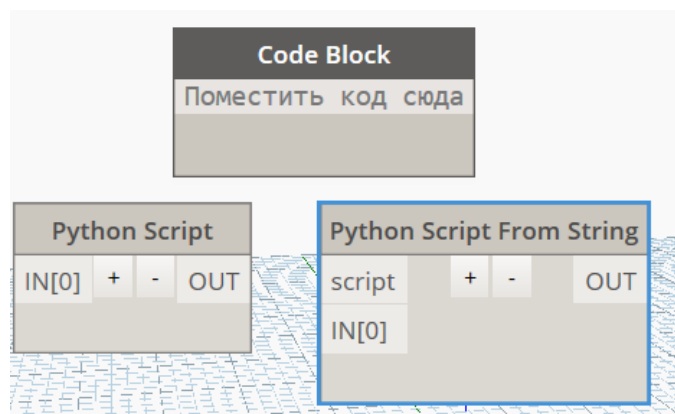


Рис. 4. Узлы ввода текстового программного кода.

Таким образом node-программирование или визуальное программирование – современная альтернатива текстовым форматам программирования, доступная большому числу пользователей без специальных знаний.

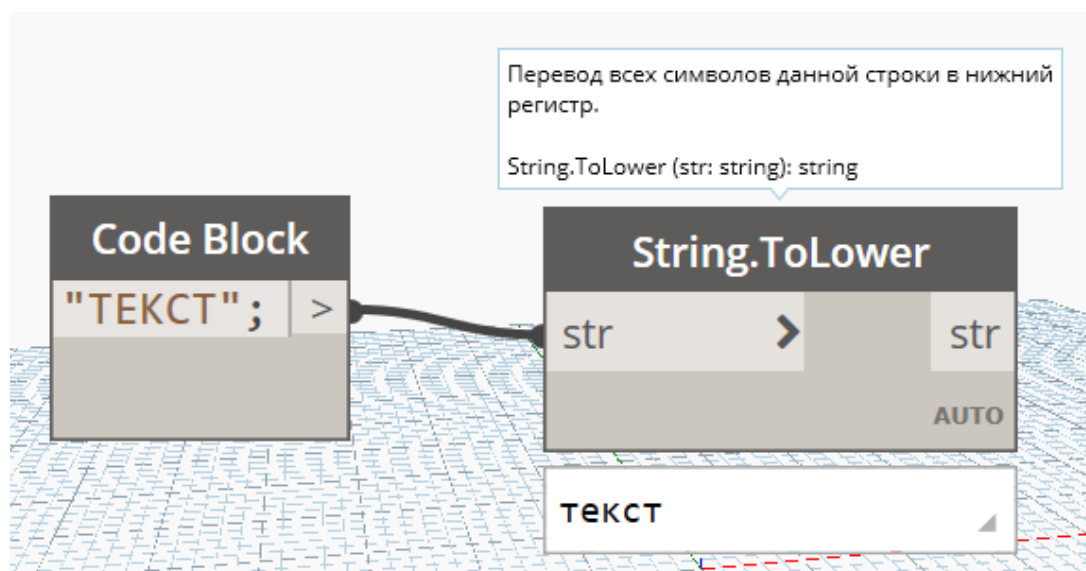


Рис. 5. Сценарий изменения регистра текста.

Программа Проигрыватель Dynamo предназначена для сохранения любого набора узлов пользовательского алгоритма в качестве сценария. Сохраненные сценарии могут быть повторно запущены, сгруппированы, изменены или использованы как фрагмент или шаблон для создания последующих алгоритмов. Кроме собственно написанных, Проигрыватель Dynamo позволяет воспользоваться множеством сторонних сценариев, предлагаемых как самой компанией Autodesk, так и другими пользователями (см. рис.6).

Пользовательские алгоритмы, обращающиеся к информационной модели, можно использовать для широкого спектра задач:

- экспорта и импорта данных в приложения пакета Microsoft Office (Word, Excel и др.) для последующего формирования текстовых и табличных отчетов;

- формирования пространственных моделей по координатам плоских двухмерных объектов;
- комплексного назначения параметров элементам модели, видам и листам проектной документации;
- автоматизированного размещения компонентов модели по заданным правилам и с соблюдением наложенных зависимостей;
- параметрического построения сложной геометрии: наклонные, криволинейные поверхности;
- автоматизированной расстановки арматуры, включая криволинейные поверхности;
- выполнения теплотехнического, гидравлического, инсоляционного расчетов зданий и сооружений;
- подсчета квартирографии и ведомостей отделки;
- автоматизированной проверки моделей на наличие ошибок и коллизий.

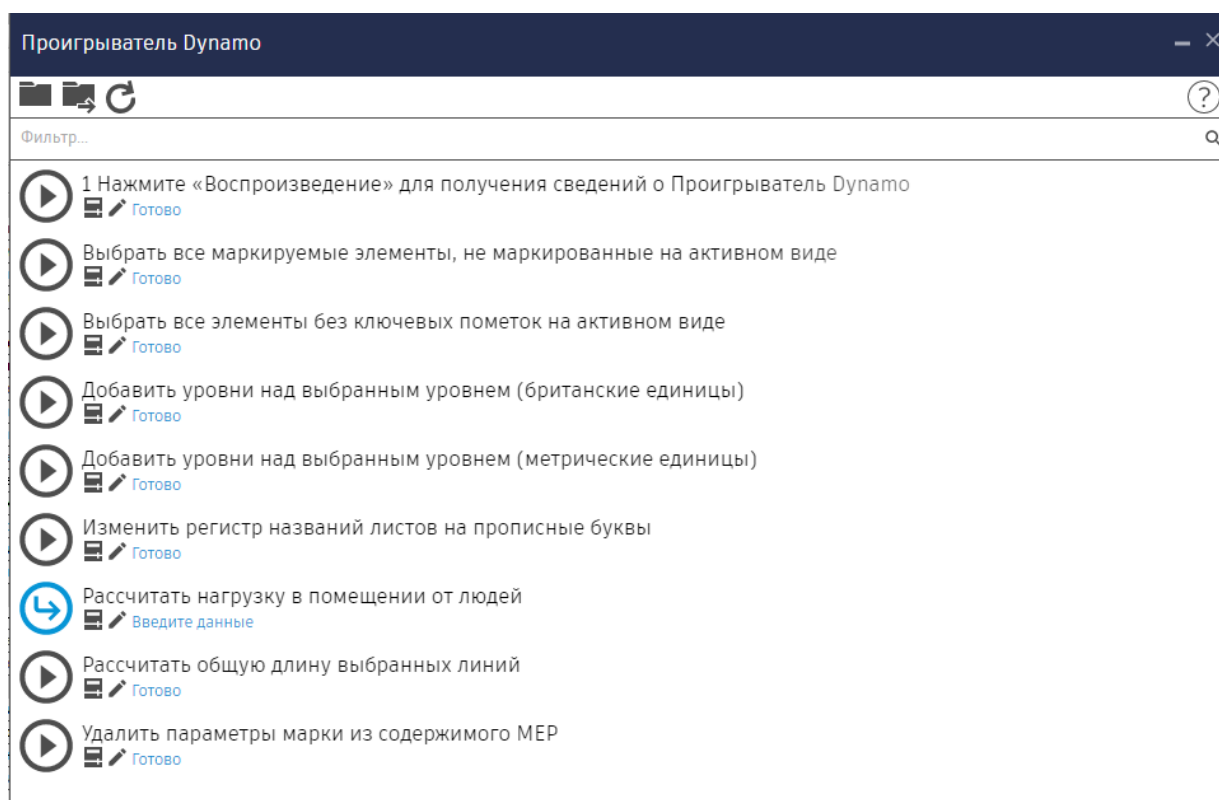


Рис. 6. Стандартные сценарии Autodesk.

Представленные выше алгоритмы являются лишь частными случаями огромного количества возможностей, открывающихся перед пользователем Dynamo. Воплощение данных возможностей позволяет раскрыть весь современный потенциал информационного моделирования.

Программные продукты Autodesk в большинстве случаев сопровождаются множеством ресурсов, помогающих приступить к работе, и среда визуального программирования Dynamo не является исключением. Стартовый экран программы содержит необходимые ссылки на форум для обсуждения и веб-сайт продукта [5], при переходе по которым можно найти множество полезных советов по созданию сценариев, ознакомиться с важными понятиями и просмотреть демонстрации использования методов работы с исчерпывающими примерами.

Несмотря на то, что, ввиду своей относительной новизны, среда Dynamo пока еще слабо распространена в русскоязычной среде и большинство источников обучения не русифицировано, нельзя не отметить постоянный рост популярности данной программы. С каждым днем сообщество пользователей Dynamo растет, что стимулирует появление в Интернет-ресурсах объёмных и подробных обучающих видеокурсов, форумов и библиотек пользовательских узлов и сценариев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов В. В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. – М.: ДМК, 2011. – 394 с.
2. Ланцов А. Л. Autodesk Revit 2015. Компьютерное проектирование зданий. – М.: ДМК, 2014. – 664 с.
3. Поддорогина Е. А., Шумилов К. А., Мазинг А. А. Разработка строительных объектов в DYNAMO REVIT // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы Всерос. науч.-практ. конф., 29-30 марта 2018 г. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – С. 177–182.
4. База знаний разработчика Autodesk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/RUS/Revit-Customize/files/GUID-F45641B0-830B-4FF8-A75C-693846E3513B-htm.html> (дата обращения 09.03.2020).
5. Официальный сайт поддержки продукта Dynamo Studio [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dynamoprimer.com/index.html> (дата обращения 09.03.2020).

ПАРШИНА С. В., КОЗЛЯТНИКОВ И. С.

НОВАЯ ВЕРСИЯ ПРОГРАММНОГО ВІМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ALLPLAN 2020

Аннотация. Приведены основные сведения о программном продукте Allplan, основанном на объектно-ориентированной базе простых 3D-объектов. Отмечены некоторые улучшения в комплексе Allplan 2020.

Ключевые слова: Allplan, Allplan Bridge, программа, проектирование, моделирование.

PARSHINA S. V., KOZLYATNIKOV I. S.

NEW VERSION OF THE SOFTWARE ALLPLAN 2020

Abstract. Basic information about the Allplan software product based on the object-oriented database of simple 3D objects is provided. Some improvements of the Allplan 2020 software have been reviewed.

Keywords: Allplan, Allplan Bridge, program, design, modeling.

Внедрение ВІМ в реальную проектную практику на сегодняшний день является популярной и наиболее обсуждаемой темой в кругах проектировщиков. В основе этой технологии лежит концепция объектно-ориентированного параметрического проектирования (моделирования) зданий, что является основным отличием ВІМ-программы от всех остальных САД-систем проектирования. Такой подход давно уже получил широкое распространение в машиностроении и в последнее десятилетие особенно активно внедряется в архитектурно-строительное проектирование [1].

Allplan, как платформа ВІМ, представляет собой комплексную систему автоматизированного проектирования (САПР), ориентированную, прежде всего, на коллективное использование. Этот программный комплекс позволяет объединить в едином информационном пространстве не только всех участников проекта, а также застройщиков, инвесторов, специалистов по эксплуатации строительных сооружений. Allplan является основным программным продуктом фирмы Nemetschek AG, основанной в 1963 году профессором Георгом Немечком в Мюнхене [2].

В России первая локализованная версия Allplan появилась в 1998 году, при этом программа была максимально приближена к отечественным нормативам, дополнена библиотеками элементов, соответствующих российским стандартам. Одной из первых организаций в нашей стране, для которой Allplan стал основным рабочим инструментом, стала фирма «Уралкомплект-наука» (г. Екатеринбург). На сегодняшний день этот

программный комплекс удерживает лидирующие позиции на рынке и используется тысячами компаний во всем мире.

Allplan учитывает специфические потребности проектировщика, легок в использовании и быстро осваивается пользователями, которые имеют даже небольшой опыт в проектировании. Одним из главных преимуществ данной программы является возможность избежать дублирования ввода одних и тех же исходных данных и, следовательно, исключить возможные ошибки, которые возникают в процессе проектирования. Все это дает возможность корректно, учитывая реальные размеры архитектурно-конструктивных элементов, преобразовывать виртуальную модель здания в расчетную схему [3].

Программный комплекс Allplan имеет ряд следующих преимуществ:

- легальное бесплатное программное обеспечение для вузов, индивидуальные лицензии для студентов и преподавателей;
- возможность участия в регулярных тематических конкурсах, проектах и конференциях;
- удобный, гибкий и интуитивно понятный пользовательский интерфейс с контекстно-ориентированным меню;
- использование структуры проекта, легкость работы с 3D-моделями и телами, а также быстрый переход между режимами проектирования от 2D к 3D, что дает возможность контролировать проект на всех этапах проектирования;
- данные из модели используются на всех стадиях проектирования.

Подтверждением того, что программный продукт Allplan является эффективным BIM-инструментом для реализации серьезных объектов, стали проекты, вошедшие в число победителей первого всероссийского открытого конкурса «BIM-технологии». В номинации «BIM-проект: многоэтажные жилые комплексы» всероссийской научно-практической конференции «Лучшие мировые практики BIM-технологий в России» призером стала Инженерно-проектная группа «РИКОМ» с проектом «20-ти этажный жилой дом со встроенными нежилыми помещениями на 1-м этаже» (см. рис. 1). Данная BIM-модель включает в себя:

- архитектурную модель здания;
- модель инженерных сетей;
- аналитическую модель для передачи данных в ПК «ЛИРА-САПР»;
- модель несущих конструкций (с возможностью использования данных BIM модели на заводе).

Компания Бюро архитектурных и дизайнерских решений «ПЯТЬ» с проектом «ЖК Тетрис» (см. рис. 2), также выполненном в Allplan, вошла в финалисты этого же конкурса. Застройка включает в себя многоквартирные жилые дома со встроенно-пристроенными помещениями: детским дошкольным учреждением, совмещенным с начальной школой, торгово-досуговым центром, медицинским центром и паркингами.



Рис. 1. 20-ти этажный жилой дом со встроенными нежилыми помещениями на 1-м этаже.



Рис. 2. ЖК «Тетрис».

В октябре 2019 года производители представили новую версию программного BIM-обеспечения – Allplan 2020, в котором особое внимание уделяется междисциплинарному сотрудничеству и 3D-моделированию. В данной версии появились обновленные модули для моделирования лестниц и крыш, а также сложных форм с использованием новых интегрированных визуальных сценариев. Эти многочисленные рабочие процессы способствуют повышению эффективности в повседневной работе проектировщиков.

Для архитекторов Allplan 2020 предоставляет возможность с помощью нового разработчика моделей крыш создавать поверхности крыши на основе контуров, используя современный пользовательский интерфейс на основе палитр свойств. В версии Allplan 2020 дополнительно улучшен дизайн лестниц в отношении повышения производительности, также появились новые смещенные профили, с помощью которых можно визуально проверить высоту и ширину проходов, что упрощает работу со сложной геометрией.

Для проектировщиков появились новинки в области железобетона и статических расчетов для мостостроения. Allplan Bridge 2020 позволяет проводить прочностной анализ, куда входит определение нагрузок, а также расчет внутренних сил, прогибов, напряжений и эффектов ползучести и усадки с учетом хода строительства. Статическая модель автоматически выводится из модели параметрического моста, благодаря чему Allplan Bridge 2020 является первым в мире полностью интегрированным решением, в котором используется общая параметрическая модель для статического расчета.

С помощью модуля визуализации в реальном времени в Allplan 2020 теперь можно определять различные температуры света, например, для достижения более теплого тона можно использовать отображение нейтрального или холодного внешнего вида. Баланс белого корректирует цветовую температуру естественных источников света, таких как небо и солнце, а благодаря двухточечной перспективе искажения могут быть устранены в кратчайшие сроки [4].

Богатые возможности моделирования, интуитивный интерфейс и простота использования облегчают создание в Allplan 2020 самых сложных форм, что значительно экономит временные затраты на проектирование. Данный программный комплекс также позволяет повысить качество выпускаемых проектов, а также снизить вероятность появления ошибок и коллизий. Все вышеперечисленное определяет выбор данного программного комплекса в качестве конкурентоспособного инструмента на рынке строительных программных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов В. В. Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 410 с.
2. Некрасов А. В., Срыбных М. А. Allplan 2014. Первый проект от эскиза до презентации: электронное учебное издание. – Екатеринбург: ООО «Уралкомплект-наука», 2014. – 250 с.
3. Герасимов Н., Гришина А. Проектируем в BIM-технологии // Журнал «Стройкомплекс Среднего Урала». – 2015. – № 7 (190). – С. 15–16.
4. Allplan 2020 – Повысьте Ваш уровень! [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allbau-software.de/index.php/produkte/allplan-1/что-нового.html> (дата обращения 24.03.2020).

ЛАЗАРЕВ А. Л., КУПРИЯШКИНА Л. И., ЕВСТИГНЕЕВА В. М.

**ДЕРЕВЯННЫЕ СЛОИСТЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
С НЕОДНОРОДНО-СЛОИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

Аннотация. В статье приводится обзор основных деревянных конструкций, имеющих неоднородно-слоистую структуру. Показаны особенности работы разносопротивляющихся слоев композитов с функционально распределенной структурой.

Ключевые слова: деревянные композиты, составной стержень, клеевой слой, дисперсное армирование, структурно-изоляционные панели, вакуумные изоляционные панели.

LAZAREV A. L., KUPRIYASHKINA L. I., EVSTIGNEEVA V. M.

**WOODEN LAYERED ELEMENTS WITH
INHOMOGENEOUS LAYERED STRUCTURE**

Abstract. The article provides an overview of the main wooden structures with inhomogeneous layered structure. The performance features of differently resisting layers of the composites with the functionally distributed structure are shown.

Keywords: wooden composites, compound rod, adhesive layer, dispersed reinforcement, structurally-insulating panels, vacuum insulation panels.

Современный уровень развития промышленного производства строительных материалов позволяет реализовывать самые высокие потребности проектировщиков. Разнообразный спектр силовых и других эксплуатационных воздействий определяет перечень функциональных требований (высокая прочность, жесткость, сопротивляемость химическим, биологическим, физическим, атмосферным воздействиям) к строительным композитам. С целью формирования оптимального современного строительного композита, создаются структуры с заданной по объему неоднородностью свойств.

Почти идеальное изменение структуры по объему с учетом функционального назначения слоев присуще древесине, что обеспечивает ее высокие эксплуатационные характеристики. Высокая удельная прочность, создаваемая внутренним «скелетом» и значительная структурная пористость позволяет использовать древесину как конструкционный материал низкой массы с высокими теплотехническими свойствами, а наличие природных смол создает защиту от многих агрессивных сред.

Наличие в материале чередующихся однородных слоев позволяет рассматривать структуру деревянного элемента в виде известной модели составного стержня, состоящего из изотропных составляющих, соединенных между собой равномерно распределенными по

всей длине связями сдвига и поперечными связями [1]. Известны аналитические зависимости для проектирования композитов с дискретной структурой. В таких системах прочность обеспечивается не только свойствами отдельных стержней, но и характеристиками связей.

Более сложная модель составного стержня описана в [2]. Элементарный стержень предложено рассматривать неоднородным, где характер изменения свойств является функцией высоты. Под такое описание в полной мере подходит широко используемые в строительстве клееные древесные элементы.

Большой интерес к слоистым композитам объясняется тем, что при их получении компенсируются естественные недостатки, присущие цельной древесине, в результате чего возрастает прочность материала, увеличивается его долговечность, а также возникают особые свойства, недостижимые для обычного материала, существенно расширяется сортамент изделий. Технология изготовления клееных деревянных конструкций (КДК) позволяет проектировщикам создавать изделия с комплексом необходимых эксплуатационных свойств [3]. Гибкость технологии позволяет получать элементы с заданным распределением свойств материалов, соответствующим эксплуатационным условиям.

Градиентность свойств в объеме отдельно взятого стержня клееного деревянного элемента обеспечивается структурным строением самой древесины, общая неоднородность проектируется, например, за счет чередования слоев древесины или за счет введения арматуры в состав КДК.

Армирование деревянных конструкций возможно для решения ряда технологических задач:

- применение деревянных конструкций для сооружений с большими пролетами и нагрузками;
- изменение эксплуатационного режима и нагрузок на конструкции;
- устранение возникающих эксплуатационных дефектов;
- реконструкция сооружений с изменением конструктивных и расчетных схем элементов;
- использование при изготовлении сращенных элементов с применением более низких сортов древесины;
- дефекты, возникающие при изготовлении клееных конструкций.

Для армирования клееных деревянных конструкций применяется широкий спектр элементов из различных материалов, таких как: стальные стержни, листовые элементы, стеклопластиковая арматура, холсты из волокон стекло- и углепластика и другие. Легкие долговечные несущие клееные армированные большепролетные конструкции применяют в

самых различных областях строительства: зрелищно-спортивные, сельскохозяйственные и складские сооружения, конструкции пролетных строений мостов и эстакад, здания с химически опасными производствами. Такая разнообразная область применения диктует весьма высокие требования к их эксплуатационным свойствам. Наиболее перспективными материалами для армирования деревянных клееных конструкций стоит считать арматуру из стекло- и углеволокна [4].

Интегрирование в клеевой слой высокомодульного волокна позволяет значительно повысить надежность работы композита. В традиционных КДК по границе клеевого слоя, соединяющего слои древесины между собой и арматурой, возникают неравномерные объемные деформации, поскольку в процессе эксплуатации возможны воздействия перепадов температуры и влажности, агрессивных сред, повторной кратковременной и длительной нагрузок и др. Применение дисперсного высокомодульного армирующего волокна в клеевом слое позволяет компенсировать влияние пиковых величин сдвигающих напряжений [5].

Еще один вид слоистых деревянных элементов, в которых свойства материала слоев существенно различны, это трехслойные клеедеревянные панели. Функциональным назначением ограждающих внешних слоев является обеспечение конструкционной прочности, а среднего слоя – теплоизоляционных функций. Классификация многослойных панелей по четырем конструктивным типам [6] учитывает наличие в их составе внутреннего утепляющего слоя и ребер жесткости, обеспечивающих малую деформативность. Обратной стороной наличия ребер является снижение теплотехнических характеристик элемента.

Применение достаточно жестких теплоизоляционных материалов позволяет изготавливать теплоизоляционные панели без ребер жесткости – так называемые структурно-изоляционные панели (СИП). Материалы, из которого изготовлены плиты и утеплитель, склеиваются между собой с помощью клея под определенным давлением. Технология СИП постоянно дорабатывается и эволюционирует под те или иные условия строительства. При этом могут изменяться комбинации материалов основной плиты и утеплителя, однако сам принцип формирования плиты остается тем же – конструкционные слои по граням элемента и слой утеплителя между ними.

Развитие промышленности материалов, применяемых для утепления, расширяет спектр элементов, изготовленных по принципу СИП. Большой несущей способностью обладают панели с конструктивными слоями, изготовленными по принципу CLT-панели. Панели состоят из нескольких слоев деревянных ламелей, склеивание которых происходит перекрестно. Производство похоже на производство фанеры и клееного бруса одновременно. Толщина массива зависит от количества слоев и толщины используемых досок. Технология

CLT-панели позволяет ввести в состав элемента теплоизоляционный слой без потери несущей способности конструкции.

Без сомнения, одним из перспективных видов слоистых панелей, с конструктивными внешними слоями, можно считать изделия с интегрированной в их структуру слоем вакуумной порошковой теплоизоляции.

Последние годы активно ведутся разработки по созданию эффективных теплоизоляционных материалов нового поколения на основе минеральных порошков, вакуумированных в специальных пакетах [7]. Исследования зарубежных ученых и проектировщиков позволяют на промышленной основе производить и применять в строительной отрасли вакуумированные теплоизоляционные панели, форма и геометрия которых обеспечиваются минеральным порошком, играющим роль наполнителей. Отечественными материаловедами получены вакуумные теплоизоляционные панели с многокомпонентным наполнителем на основе дисперсных порошков из природных диатомитов, позволяющие: обеспечивать заданную форму при изготовлении и в процессе эксплуатации; воспринимать значительное внешнее давление; обеспечивать возможность управления созданием многоуровневой поровой структуры наноразмерного уровня.

Несмотря на существующие примеры возведения высотных деревянных домов с использованием технологий КДК и CLT-панелей (Mjøstårnet Tower, 18 этажей, Брюмундал, Норвегия), проблема недостаточной жесткости деревянных конструкций, имеющих в своем составе слой утеплителя, остается актуальной. Наибольшая сложность заключается в получении достаточно жесткого элемента с монолитным теплоизоляционным слоем. Панели с ребрами жесткости обладают более высокой несущей способностью по сравнению с безреберными элементами, но имеют и большую теплопроводность, а ребра жесткости служат дополнительными проводниками холода. Проектировщики для различных трехслойных элементов разрабатывают способы жесткого соединения материалов ограждающих слоев и «псевдомонолитного» теплоизолирующего слоя.

Создание новых строительных материалов и решение актуальных проблем, возникающих при изготовлении и эксплуатации конструкций на их основе, неуклонно расширяет область применения деревянных композитов с неоднородно-слоистой структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1991. – 440 с.
2. Селяев В. П., Карташов В. А., Кlementьев В. Д., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.

3. Щуко В. Ю., Рощина С. И. Клееные армированные деревянные конструкции: учебное пособие. – Владимир: ВлГУ, 2008. – 82 с.
4. Лазарев А. Л. Создание градиентных покрытий с применением элементов внешнего армирования из углеволокна // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / отв. ред. Т.А. Низина. – Саранск, 2016. – С. 68–71.
5. Лазарев А. Л., Полторацкий Д. М., Тянкин И. А. Практическая реализация методов проектирования внешнего армирования деревянных элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел «Технические науки». – 2018. – №9. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskaya-realizaciya-metodov-proektirovaniya-vneshnego-armirovaniya-derevyannykh-elementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnykh-kompozicionnykh-materialov> (дата обращения 25.01.2020).
6. Карлсен Г. Г., Слискоухов Ю. В. Конструкции из дерева и пластмасс. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.
7. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вакуумированных дисперсных порошков микрокремнезема и диатомита: монография / В. П. Селяев, В. А. Неверов, А. К. Осипов, Л.И. Куприяшкина Л. И. и [др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – 220 с.

ЕВСТИГНЕЕВА В. М., ЛАЗАРЕВ А. Л., САНГУЛОВА И. Б.

**ХАРАКТЕР НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
АРМИРОВАННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Аннотация. В статье приводятся основные сведения об исследованиях, направленных на изучение характера работы на изгиб и разрушение армированных клееных деревянных конструкций. Приведены данные о теоретических и практических работах исследователей по способам армирования элементов с целью обеспечения высокой степени надежности работы конструкций под эксплуатационной нагрузкой.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, составной стержень, клеевой слой, клееные деревянные конструкции, дисперсное армирование.

EVSTIGNEEVA V. M., LAZAREV A. L., SANGULOVA I. B.

**REINFORCED BENDABLE GLUED WOODEN ELEMENTS
IN STRESS-DEFORMED STATE**

Abstract. The article presents an overview of the research works aimed at studying the bending strain and fracture in reinforced glued wooden structures. The study provides theoretical and practical data on the methods of reinforcing glued wooden elements in order to ensure high reliability of the structures under operational load.

Keywords: stress-deformed state, composite core, adhesive layer, glued wooden structures, dispersed reinforcement.

В последнее время неуклонно растет спектр применения деревянных, в том числе слоистых, конструкций. Обеспечение высокой надежности клееных деревянных конструкций (КДК) и безотказность их работы в течение всего срока службы непосредственно связано с разработкой клееного элемента для конкретных условий эксплуатации. Проектирование структуры композита является актуальной и сложной проблемой как с экспериментальной, так и с математической точки зрения в силу анизотропности древесины и зависимости ее свойств от различных природных и технологических факторов.

В работе представлены результаты теоретического и практического изучения напряженно-деформированного состояния клееных деревянных армированных элементов. Объектом исследования являлись клееные деревянные композиты, усиленные материалами с более высокими, по сравнению с древесиной, прочностными характеристиками. Традиционно усиление деревянных конструкций выполняется за счет вклеивания стержневой металлической или стеклопластиковой арматуры. Перспективным также является способ армирования полотнами стекло- и углеволокна. Армирование наиболее напряженных зон

позволяет не только усилить деревянные элементы, но и уменьшить отрицательное влияние природных и технологических дефектов древесины [1; 2].

При разработке армирования деревянных элементов учитываются следующие основные требования:

- согласованность характера деформирования арматуры и древесины;
- технологичность выполнения армирования клееных деревянных конструкций.

Кроме того, необходимо принимать во внимание наличие напряжений по границам конструкционного материала и арматуры, которые могут приводить к растрескиванию элементов.

В работе [3] показано, что при проектировании клееных деревянных элементов рационально использовать в качестве расчетной модели составной стержень. В подобном случае структура композита моделируется стержневой системой, в которой составляющие стержни соединены равномерно-распределенными по длине связями, воспринимающими сдвигающие усилия, и препятствующими отрыву или прижатию стержней друг к другу. Материал отдельных слоев упрощенно представляется практически однородным. Условно податливость поперечных связей не учитывается, что существенно упрощает расчет составного стержня.

Расчет составного стержня, как статически неопределимой системы, ведется относительно основного стержня, лишенного связей сдвига, которые условно заменены функциональными неизвестными τ_i . В процессе работы составного стержня, включающего $n+1$ отдельных стержней, в связях сдвига возникают сдвигающие усилия, зависящие от координаты x соединительного шва:

$$T_i = \int_0^x \tau_i dx, \quad (1)$$

где T_i – сдвигающие усилия в шве.

С учетом этих усилий формула для определения полного изгибающего момента в системе выглядит следующим образом:

$$M = M^0 + \sum_{i=1}^{n+1} M_i^{\tau} = M_0 - \sum_{i=1}^n T_i u_i - \sum_{i=1}^n T_i v_i = M^0 - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i, \quad (2)$$

где M^0 – суммарный изгибающий момент, равный сумме моментов, возникающих в каждом отдельном стержне от действия нагрузки без учета усилий, передающихся от поперечных связей и связей сдвига, T_i – сдвигающие усилия в шве, а ω_i – расстояние между центрами тяжести сечений двух смежных стержней, разделенных i -м швом.

Осевое усилие N_i в конкретном стержне системы определяется выражением:

$$N_i = N_i^0 - T_i + T_{i-1} (i = 1, 2, \dots, n + 1). \quad (3)$$

Внутренний момент в том же стержне определяется умножением полного момента по формуле (2) на $E_i J_i$: $(\sum E J)$

$$M_i = \frac{M^0}{\sum E_i J_i} E_i J_i - \sum_{j=1}^n T_j \omega_j \frac{E_i J_i}{\sum E_i J_i}. \quad (4)$$

Тогда нормальные напряжения в отдельном стержне определяются по формуле

$$\sigma_x = \frac{N_i}{F_i} + \frac{M_i y_i}{J_i}, \quad (5)$$

где F_i – площадь поперечного сечения i -го стержня, y_i – расстояние от центра тяжести сечения до рассматриваемого волокна

Эпюра нормальных напряжений в составном стержне выглядит ступенчатой по границам отдельных стержней с перепадом значений на величину, равную $M \cdot \omega_i / (\sum E J)$, с одинаковым наклоном к вертикальной оси.

Следует отметить, что данная методика описания напряженно-деформированного состояния справедлива для систем с дискретным распределением свойств по высоте поперечного сечения, аналогичным структуре клееных деревянных элементов. Применение ее для случаев с равномерным распределением свойств по высоте поперечного сечения элемента может не давать рациональных решений.

Как было сказано выше, стержни составного элемента соединены между собой непрерывными связями, в которых возникают сдвиговые усилия T_i по формуле (1). Величины и характер распределения напряжений от этих усилий в клеевой прослойке, зачастую, оказывают определяющее значение на несущую способность клееных армированных конструкций.

Известна неоднородность характера распределения касательных напряжений в клеевых соединениях с максимальными значениями около торцов клееного элемента (рисунок 1). Подобное распределение создает опасность локальных краевых расслоений клееных элементов и их разрушению до исчерпания прочности отдельного стержня [5]. Очевидно, что уменьшение неоднородности распределения напряжений в клеевом слое позволит значительно повысит надежность работы армированного композита.

Для решения вышеназванной задачи использовались аналитические зависимости, предложенные в работе [6]. Технологически управление характером напряженного состояния соединительной прослойки выполняется за счет изменения ее толщины и введением в состав клея дисперсных волокон углеродного волокна.

Усиление клеевого слоя дисперсной арматурой является оптимальным способом армирования клееных деревянных конструкций. При вклеивании стержневой арматуры возможно возникновение неоднородных внутренних напряжений, которые нередко приводят к нарушению монолитности клееных элементов, локальному разрушению клеевого соединения и ослаблению всей конструкции.

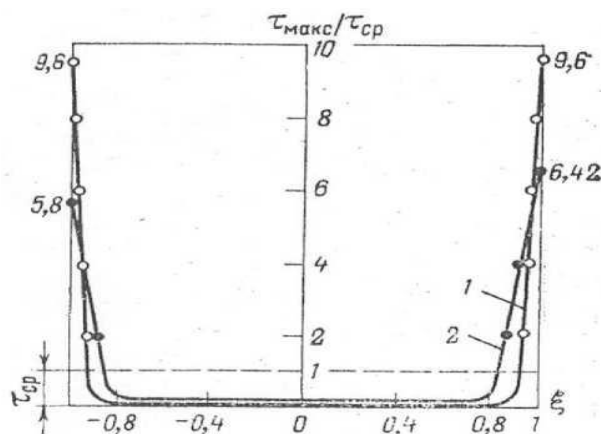


Рис. 1. Распределение касательных напряжений по длине клевого шва (по данным [5]).

Армирование дисперсной, распределенной по клеевому слою арматуры из углеродных волокон позволяет снизить локальные напряжения в клеевом слое. Армирование блоков клееных балок, рассредоточенное в плоскости склеивания, увеличивает площадь сцепления упрочняющего материала с древесиной и уменьшает напряженность в клеевом соединении, что в результате приводит к уменьшению деформации сдвига.

Серии испытаний на изгиб деревянных балок, армированных углеродными холстами в растянутой зоне, ожидаемо показали значительное снижение деформативности и увеличение прочности. При этом, в подтверждение предположения о неравномерности распределения напряжений в клеевом слое, значительная часть образцов исчерпала свою несущую способность за счет отрыва армирующего слоя и последующего разрушения образца по нормальному сечению.

Последующим испытаниям подвергались клеелесовые балки с толщиной клеевой прослойки, постепенно увеличивающейся к торцам элементов, и составные образцы, в которых клеевая прослойка на приопорных участках дополнительно армировалась дисперсными углеродными волокнами. Образцы обеих серий разрушились без отрыва арматуры при значительно больших значениях разрушающей нагрузки.

При изготовлении многослойных клеелесовых балок необходимым условием является армирование срединных клеевых швов в силу известного характера распределения касательных напряжений по высоте поперечного сечения. Проведенные исследования демонстрируют значительный потенциал применения деревянных армированных композитов. Знание характера напряженно-деформированного состояния клееных конструкций дает исследователям возможность правильного выбора методов и способов создания структур, позволяющих более полноценно использовать возможности древесины как конструкционного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щуко В. Ю., Рощина С. И. Клееные армированные деревянные конструкции: учебное пособие. – Владимир, ВлГУ, 2008. – 82 с.
2. Лазарев А. Л. Создание градиентных покрытий с применением элементов внешнего армирования из углеволокна // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. / отв. ред. Т. А. Низина. – Саранск, 2016. – С. 68–71.
3. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1991. – 440 с.
4. Селяев В. П., Карташов В. А., Клементьев В. Д., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.
5. Петряев Н. Е., Левинский Ю. Б. Экспериментально-теоретическое обоснование эффективности дисперсионного армирования клееных деревянных балок // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – №2 (14). – С.102–106.
6. Лазарев А. Л., Полторацкий Д. М., Тянякин И. А. Практическая реализация методов проектирования внешнего армирования деревянных элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] // Огарев-online. Раздел «Технические науки». – 2018. – №9. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskaya-realizaciya-metodov-proektirovaniya-vneshnego-armirovaniya-derevyannykh-elementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnykh-kompozicionnykh-materialov> (дата обращения 10.02.2020).

**КУПРИЯШКИНА Л. И., ЛАЗАРЕВ А. Л.,
СЕДОВА А. А., МЕЩЕРЯКОВ А. Е., ЦЫГАНОВ Р. Н., НУРЛЫБАЕВ Р. Е.**

**ВЛИЯНИЕ ЛИМОННОЙ КИСЛОТЫ
НА НАПОЛНЕННЫЕ ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ**

Аннотация. Изучено влияние карбоновой кислоты на цементные композиты, наполненные цеолитсодержащими породами. Методом растровой электронной микроскопии определен элементный состав осадка. Дан анализ фильтрата после выдерживания образцов цементного камня в лимонной кислоте. Рассмотрено изменение pH-среды в модельных растворах.

Ключевые слова: цементный композит, наполнитель, цеолитсодержащие породы, модельный раствор, карбоновые кислоты, лимонная кислота, биоповреждение, фильтрат, структура осадка.

**KUPRYASHKINA L. I., LAZAREV A. L., SEDOVA A. A.,
MESHCHERYAKOV A. E., TSYGANOV R. N., NURLYBAEV R. E.
THE EFFECT OF CITRIC ACID ON FILLED CEMENT COMPOSITES**

Abstract. The effect of the carboxylic acid on cement composites filled with zeolite-containing rocks was studied. The elemental composition of the sediment was determined by scanning electron microscopy. The analysis of the filtrate after holding the samples of cement stone in citric acid is given. The change in the pH medium in model solutions is considered.

Keywords: cement composite, filler, zeolite-containing rocks, model solution, carboxylic acids, citric acid, biodeterioration, filtrate, sediment structure.

В процессе эксплуатации бетонные и железобетонные конструкции подвергаются воздействию агрессивных сред. Технические характеристики сооружений снижаются в большинстве случаев уже через 6-10 лет, если не проводить ремонтно-оздоровительные работы. В поверхностном слое бетона под воздействием жидких сред развиваются необратимые деструктивные процессы, которые приводят к образованию микротрещин, уменьшению плотности, водонепроницаемости и снижению прочности. Процессы деградации материала возрастают с интенсивным нарастанием коррозионных процессов [1].

В целом, неуправляемая деградация бетона и конструкций, подверженных неблагоприятным воздействиям, приводит к снижению долговечности сооружений и преждевременному старению [2; 3].

Проблема повреждения строительных конструкций в результате воздействия минеральных или органических кислот в настоящее время является актуальной. Различные

микроорганизмы, поселяясь на поверхности бетона (что визуально наблюдается в виде появления наростов и обширных пятен различных цветов), негативно влияют на эстетику помещений. Химические реакции между цементным камнем и продуктами жизнедеятельности микроорганизмов приводят к нарушению сцепления составляющих компонентов этих материалов и способствуют разрушению бетона.

Продуктами метаболизма (жизнедеятельности) микроорганизмов, поселяющихся на поверхности бетона, являются низкомолекулярные карбоновые кислоты. Эти кислоты выделяются микроорганизмами в достаточно большом количестве и на внешней поверхности бетона образуется агрессивная кислотная «пленка» с достаточно низким значением pH-среды. Взаимодействие карбоновых кислот с бетоном приводит к высвобождению из него ионов кальция, магния, железа и протеканию реакции комплексообразования на поверхности бетона, что обуславливает появление микротрещин, которые постепенно расширяются и углубляются [4]. Процесс биоповреждения инициирует процесс деградации поверхности бетона и, соответственно, разрушение строительных конструкций.

Для исследования в качестве органической кислоты была выбрана лимонная кислота $C_6H_8O_7$ – белое кристаллическое вещество, хорошо растворимое в воде и этиловом спирте. Слабая трехосновная кислота ($pK_{a1} = 3,10$; $pK_{a2} = 4,76$; $pK_{a3} = 6,40$) проявляет общие для всех карбоновых кислот свойства. Для создания модельной слабоагрессивной среды использовали растворы кислоты концентрацией: 0,5; 1,0 и 2,0 %. Цементные композиционные материалы, наполненные цеолитсодержащими породами (ЦСП) (степень наполнения составляла: 10; 20; 30 % от массы цемента; крупности наполнителя – 0,315; 0,630; 1,250 мм), выдерживали в растворах кислоты заданной концентрации, моделирующих продукты метаболизма микроорганизмов. Периодически осуществлялись измерения концентрации цитрат-ионов и pH-среды.

Анализ экспериментальных данных (см. рис.1) показал, что при контакте 0,5 %-ной лимонной кислоты с цементным камнем наблюдается быстрое снижение концентрации до минимума уже через 2-е суток, в 1%-ных растворах – через 5 суток, в 2%-ных – через 3 суток. Вероятно, быстрое снижение концентрации цитрат-ионов в растворах связано с их большой активностью и реакционной способностью по отношению к ионам Fe^{3+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , вымываемыми из цементного камня за счет образования устойчивых комплексных соединений. Следует отметить, что ход кинетических кривых зависимости « $C_{C_6H_8O_7} - \tau$, сутки» не зависит от степени наполнения цементного камня цеолитсодержащей породой и размера гранул наполнителя.

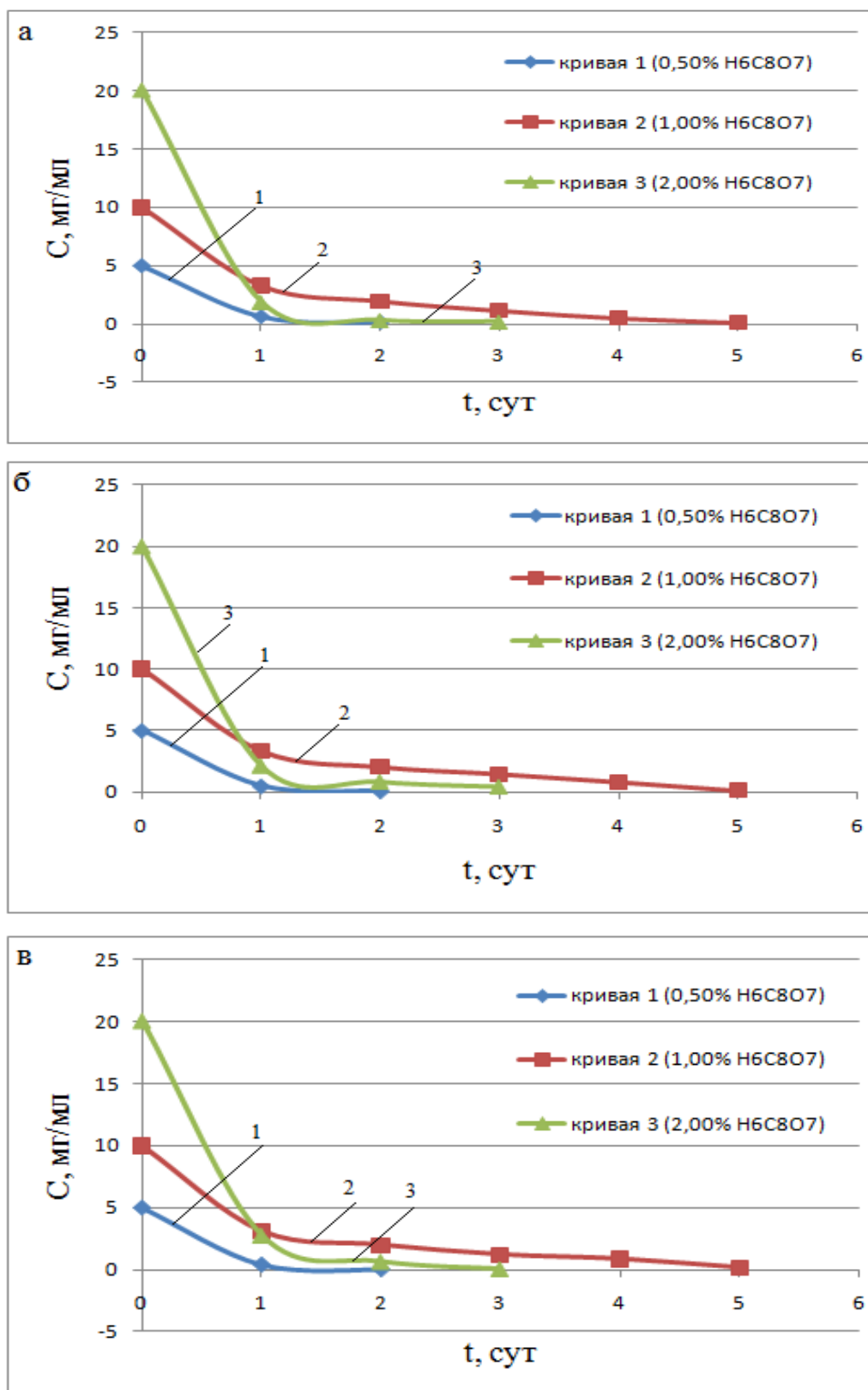


Рис. 1. Изменение концентрации лимонной кислоты от времени контакта с цементным камнем, наполненным ЦСП, %: а) 10; б) 20; в) 30.

В ходе эксперимента наблюдается монотонное возрастание рН реакционной смеси (переход в щелочную область) (см. рис. 2). Это, вероятно, объясняется взаимодействием лимонной кислоты с цементным камнем и вымыванием из него в водный раствор ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} .

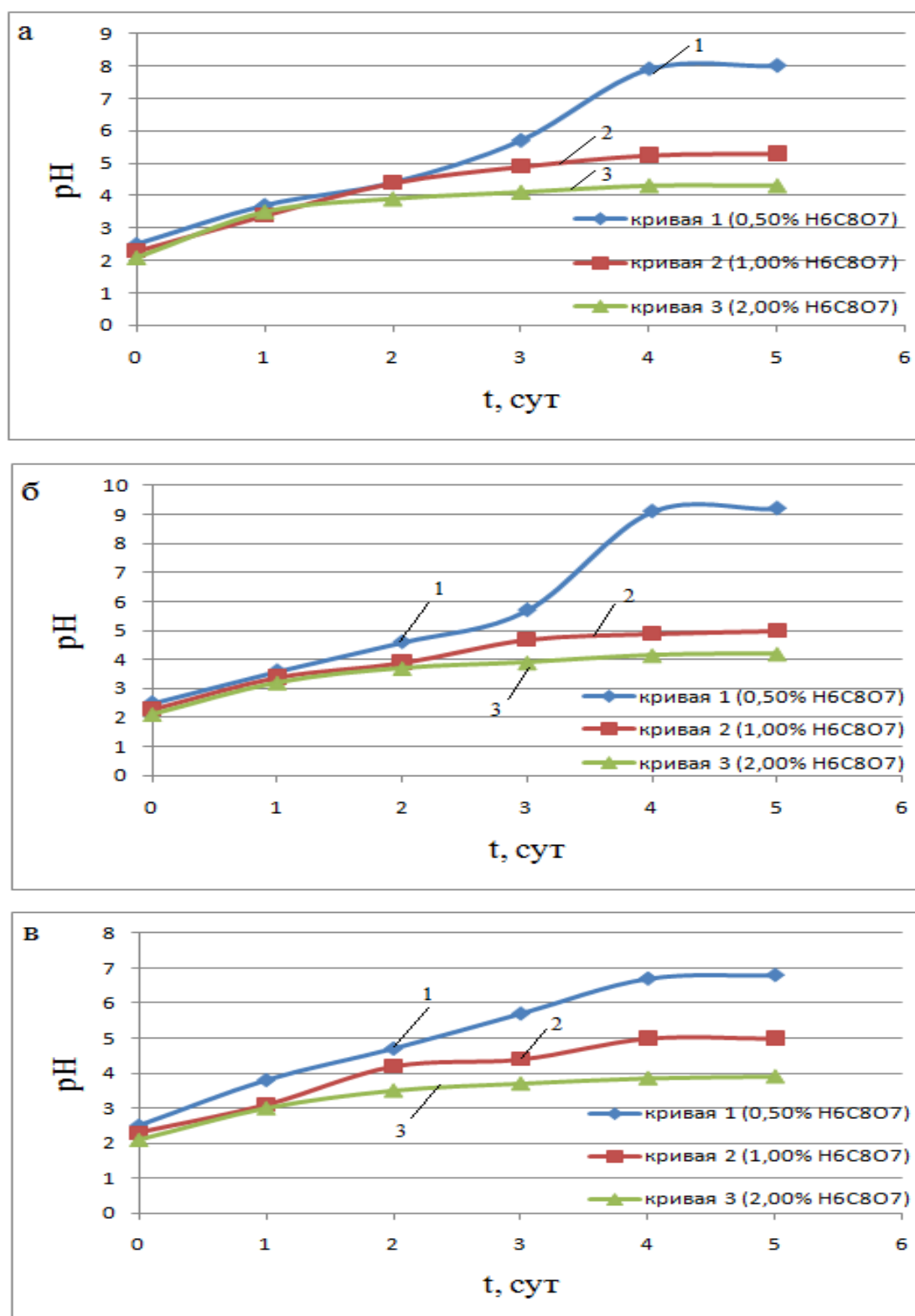


Рис. 2. Динамика изменения рН-среды при выдерживании цементного камня в растворах лимонной кислоты различной концентрации. Содержание ЦСП в цементном камне: %: а) 10; б) 20; в) 30.

Результаты анализа фильтрата методом ионной хроматографии являются подтверждением выше сказанного (табл. 1).

Таблица 1

**Результаты анализа фильтрата после выдерживания
цементного камня в растворе лимонной кислоты**

ω, %	ЦСП, %	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Al ³⁺
0,5	10	136,86 ± 0,004	14,771 ± 0,002	6,8377 ± 0,114	73,1050 ± 0,109
	20	179,354 ± 0,024	24,465 ± 0,001	7,3988 ± 0,117	115,0555 ± 0,099
1	10	114,988 ± 0,011	13,610 ± 0,004	14,3660 ± 0,094	177,2140 ± 0,120
	30	120,840 ± 0,013	11,199 ± 0,012	15,2523 ± 0,116	190,3612 ± 0,117
2	10	136,860 ± 0,020	14,771 ± 0,017	38,7745 ± 0,097	802,6900 ± 0,116
	30	333,873 ± 0,008	24,857 ± 0,011	42,0946 ± 0,083	963,7358 ± 0,114

При этом следует заметить, что содержание кальция в фильтрате зависит от степени содержания ЦСП в цементном камне – чем больше доля ЦСП, тем выше содержание Ca²⁺ в фильтрате. Содержание ионов Ca²⁺ выше содержания ионов Mg²⁺. Результаты анализа фильтрата на содержание Fe³⁺ и Al³⁺ свидетельствуют о большем содержании Al³⁺ в фильтрате, чем Fe³⁺, что согласуется с элементным составом ЦСП.

При наблюдении за окраской раствора и внешним видом цементного камня было зафиксировано, что раствор-фильтрат окрашивается в желто-зеленый цвет. Углубление окраски наблюдается по мере увеличения продолжительности контакта «цементный камень – лимонная кислота» и с увеличением концентрации кислоты. На поверхности образцов появляется окрашенная пленка, которая постепенно переходит в осадок. После отделения фильтрата от образовавшегося осадка был проведен анализ на содержание ионов Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺ методом ионной хроматографии. Содержание ионов Fe³⁺, Al³⁺ определялось атомно-абсорбционным методом. Осадок, выделенный из фильтрата, сушили и исследовали методом растровой электронной микроскопии.

Из анализа таблицы 1, где представлены результаты анализа осадка, полученного после выдержки цементного камня в растворах лимонной кислоты различной концентрации, методом растровой электронной микроскопии можно сделать вывод, что осадок в большей мере состоит из соединений Ca.

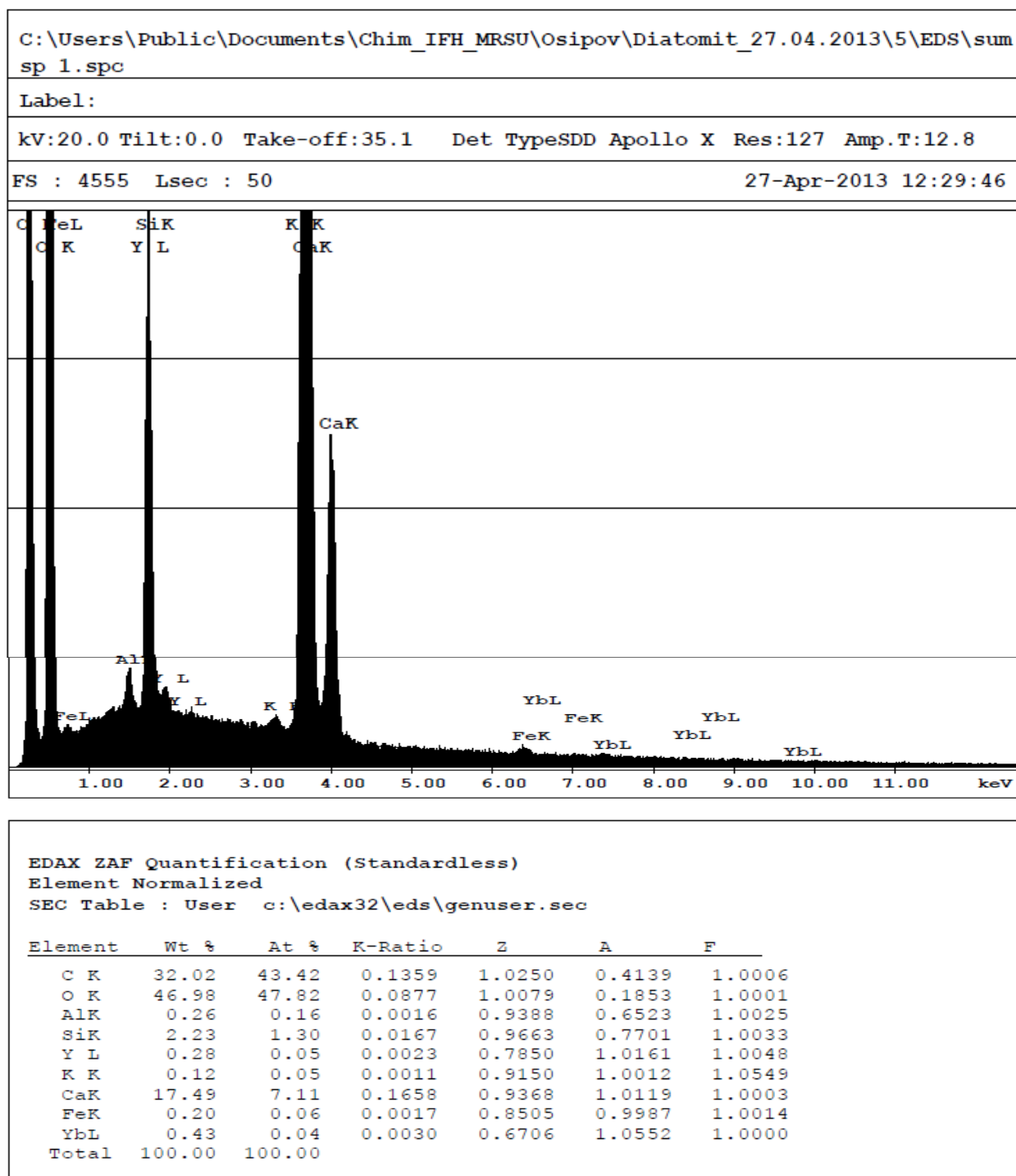


Рис. 3. Анализ структуры осадка, полученного после выдержки композита в 2,0% лимонной кислоте.

Методом растровой электронной микроскопии был определен элементный состав осадка, который образовался на цементном камне в системе «цементный камень – лимонная кислота» (см. рис. 3). Результаты анализа свидетельствуют, что осадок в большей мере состоит из соединений кальция. При этом содержание CaO зависит от концентрации лимонной кислоты. Как правило, содержание CaO увеличивается с повышением степени наполнения ЦСП до 30% от массы цемента. Оксид магния обнаружен лишь в нескольких осадках. Осадки содержат также оксиды Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 .

Метод гранулометрии позволил установить структуру осадка. Структура осадка после выдерживания в 0,5 %-ной лимонной кислоте представлена на рисунке 4, из которого видно, что в осадке содержатся кристаллы в виде игл (а). При увеличении степени наполнения до 30% наблюдается повышение плотности осадка (б).

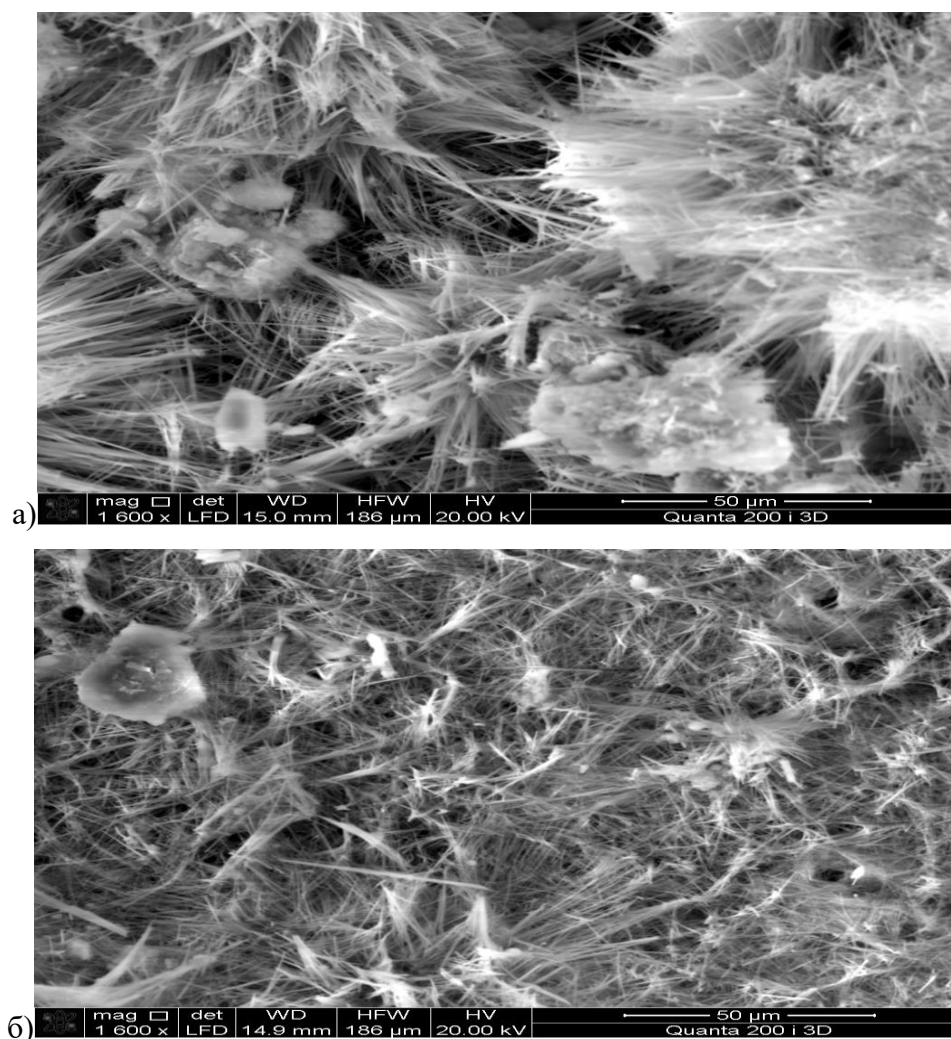


Рис. 4. Структура осадка цементного камня, наполненного ЦСП:
а) 10 %, б) 30 %, полученная на многофункциональном растровом электронном микроскопе с интегрированной системой фокусированного ионного пучка Quanta 200i 3D FEI при увеличении $\times 1600$.

В системе «цементный композит – лимонная кислота» осадок состоит из кристаллов труднорастворимого цитрата кальция, имеет форму игл. Это оптимальная форма для кристалла, формирующего и растущего в пористых телах и средах (см. рис. 4). Образование и кристаллизация малорастворимых продуктов в порах цементного камня создает внутреннее напряжение, которое приводит к повреждению структуры бетона и снижению его прочности. При сопоставлении прочности цементных композитов с массой образовавшего осадка можно сказать, что прочность снижается по мере увеличения массы осадка, образовавшего на поверхности композита и перешедшего в раствор.

Таким образом, увеличение массы осадка свидетельствует о повышении коррозии цементного камня. Деградацию железобетонных конструкций, вызванную проникновением органических кислот в цементные бетоны, можно замедлить путем введения цеолитсодержащих пород (не более 20%), увеличивая рН-показатель. Это замедляет процессы разрушения бетона и уменьшает корродируемость арматуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвин В. М., Иванов А. М., Алексеев С. Н. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
2. Гарынкина Е. Н., Куприяшкина Е. И., Куприяшкина Л. И., Седова А. А. Анализ осадка при взаимодействии наполненного цементного камня с солями магния [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2017. – №11. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/analiz-osadka-pri-vzaimodejstvii-napolnennogo-cementnogo-kamnya-s-solyami-magniya> (дата обращения 25.01.2020).
3. Седова А. А., Иванов В.М., Селяев В. П., Осипов А. К., Куприяшкина Л. И. Изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот // Вестник Моск. ун-та. Сер.2, Химия. – 2014. – Т.55. – № 5. – С. 296-301.
4. Строганов В. Ф., Потапова Л. И. Комплексное исследование процессов биоповреждения минеральных строительных материалов // Известия КГАСУ. Строительные материалы и изделия. – 2011. – № 4 (18). – С. 274-280.

НИЗИН Д. Р., НИЗИНА Т. А., КАНАЕВА Н. С.,
АРТАМОНОВ Д. А., КЛИМЕНТЬЕВА Д. А.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ
МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ
ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ¹**

Аннотация. В работе предложен подход для исследования механизма деформирования эпоксидных полимеров, основанный на методах фрактального исчисления. Показаны преимущества методики определения индекса фрактальности кривых деформирования полимерных образцов с использованием метода минимального покрытия. Предложен алгоритм количественного определения положения «критических» точек кривых деформирования полимерных образцов при растяжении.

Ключевые слова: эпоксидные полимеры, кривые деформирования, фрактальный анализ, временные ряды, метод минимальных покрытий.

NIZIN D. R., NIZINA T. A., KANAIEVA N. S.,
ARTAMONOV D. A., KLIMENTEVA D. A.

**APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS METHODS TO STUDY
DEFORMATION AND DESTRUCTION MECHANISMS
OF EPOXY POLYMER SAMPLES UNDER TENSILE STRESSES¹**

Abstract. The paper proposes an approach to study the mechanism of deformation of epoxy polymers based on the methods of fractal calculations. The advantages of the method for determining the fractality index of the deformation curves of polymer samples using the minimum coverage method are shown. An algorithm for the quantitative determination of the location of the "critical" points of the deformation curves of polymer samples under tension is suggested.

Keywords: epoxy polymers, deformation curves, fractal analysis, time series, minimal coverage method.

Анализ механизмов деформирования и разрушения композиционных строительных материалов является важной задачей строительного материаловедения, актуальность решения которой в связи с разработкой новых видов композиционных материалов на основе полимерных связующих растёт год от года. Известно, что разрушение композиционных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-08-01050 А «Исследование влияния интенсивности воздействия климатических факторов на характер разрушения полимерных композитов и прогнозирование их долговечности в условиях натурального воздействия».

строительных материалов представляет собой процесс множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов и микротрещин вплоть до появления макротрещин [1]. Неоднородность структуры строительных материалов приводит к формированию ослабленных зон, с которых впоследствии и начинается разрыхление и разрушение композитов. Достижение микротрещиной включения (поры или заполнителя) приводит к сбросу критической плотности энергии в устье трещины и переходу системы к нестабильному состоянию (точке бифуркации). В точке бифуркации возможно ветвление, изменение механизма и направления развития трещины разрушения [2]. При этом разрушение имеет вероятностную природу, а сам процесс накопления повреждений самоподобен, что делает перспективным использование для его анализа методов фрактального анализа [2–5].

В научной литературе приводятся различные способы определения фрактальной размерности структуры реальных композиционных материалов на основе цементных вяжущих и полимерных связующих [1; 5–10]. В работах [11; 12] авторским коллективом предложена методика определения фрактальной размерности кривых деформирования на основе метода минимального покрытия, позволяющая получать интегральную количественную оценку процесса разрушения мелкозернистых бетонов при сжатии и определять положение параметрических точек кривой разрушения, построенной с высокой частотой снятия показаний (0,01 сек.). Последующее использование предложенной методики при анализе кривых деформирования образцов мелкозернистых бетонов с различными комплексами модифицирующих добавок показал его перспективность для получения ценной информации о процессе разрушения композиционных материалов различной природы. В данной работе разработанный подход был использован для фрактального анализа механизма деформирования и разрушения полимерных композиционных материалов под действием растягивающих нагрузок.

В качестве объекта исследования был выбран полимер, получаемый на основе модифицированной эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07), отверждаемой отвердителем Этал-1440Н (ТУ 2257-3570-18826195-03), представляющим собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированную салициловой кислотой. Технические характеристики смолы Этал-247: массовая доля эпоксидных групп – не менее 21,4-22,8%; вязкость по Брукфильду при 25 °С – 650-750 СПз. Компаунды, отверждаемые Этал-1440Н, имеют длительную жизнеспособность – 4-5 часов при +20°С, обеспечивают теплостойкость отвержденных композиций по Мартенсу до 140°С.

Для проведения механических испытаний составов полимерных композитов на растяжение использовалась разрывная машина серии AGS–X с программным обеспечением

TRAPEZIUM X. Частота фиксации значений напряжений и деформаций составляла 0,01 сек. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» при температуре 23 ± 2 °C и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин. Параллельно испытывали не менее 6 образцов, имеющих форму «восьмерок» (тип 2 согласно ГОСТ 11262-2017).

Анализ полученных результатов показал, что кривая деформирования для образцов данного состава характеризуется как восходящей, так и нисходящей ветвями, что позволяет определить прочностные и деформационные характеристики эпоксидного полимера при растяжении и разрыве (рис. 1, а). Предел прочности при растяжении и относительное удлинение при максимальной нагрузке, соответственно, равны 41,05 МПа и 8,53%; предел прочности и относительное удлинение при разрыве (разрушении) – 38,47 МПа и 10,14%.

Детализация кривой деформирования (рис. 1, б), построенной с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой снятия показаний, свидетельствует, что процесс нагружения (рис. 1, а) сопровождается дискретными актами повышения и падения напряжений (рис. 1, б). При этом, учитывая, что изменение деформаций и напряжений в исследуемых образцах при проведении механических испытаний фиксировалось во времени с определенным заданным шагом (0,01 с), для анализа кривых деформирования с выявлением на ней характеристических точек целесообразно применение теории фрактального анализа временных рядов.

Рассмотрим временной ряд $y(t)$, определенный на некотором участке $[a, b]$. Для вычисления фрактальной размерности используем более точный по сравнению с методом клеточной размерности метод минимального покрытия, основные положения которого изложены в работах [12 – 15]. Суть метода заключается в равномерном разбиении отрезка

$$\omega_m = [a = t_0 < t_1 < \dots < t_m = b]$$

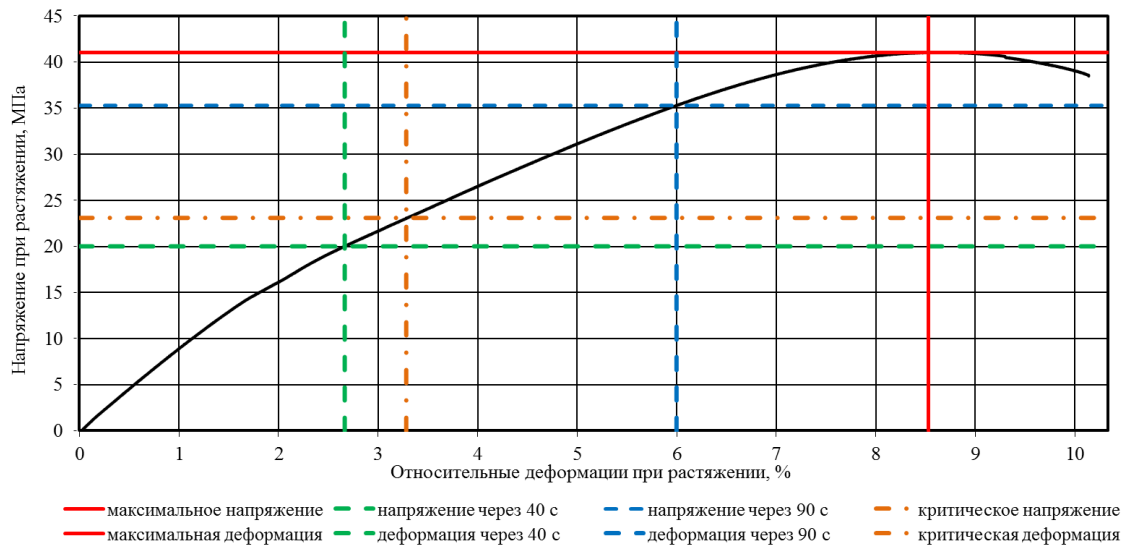
на m частей и подсчете функции $y = f(t)$ в классе покрытий, состоящих из прямоугольников с основанием $\delta = \frac{b-a}{m}$ (рис. 2 [13]). Тогда высота прямоугольника на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$ будет равна разности между максимальным и минимальным значением функции $f(t)$ на этом отрезке – $K_i(\delta)$. Введя величину амплитудной вариации функции $f(t)$, соответствующей масштабу разбиения δ на отрезке $[a, b]$

$$V_f(\delta) = \sum_{i=1}^m K_i(\delta), \quad (1)$$

получим зависимость для определения полной площади покрытия:

$$S_\mu(\delta) = V_f(\delta) \times \delta. \quad (2)$$

а)



б)



Рис. 1. Общий вид (а) и фрагмент (б) кривой деформирования образцов эпоксидных полимеров при растяжении (сплошной линией красного цвета на рисунке «а» обозначен уровень максимальных напряжений и соответствующих им деформаций).

Тогда согласно [4; 13] индекс фрактальности μ можно определить из линейаризации зависимости

$$V_f(\delta) \sim \delta^{-\mu} \text{ при } \delta \rightarrow 0. \quad (3)$$

При этом фрактальная размерность связана с индексом фрактальности, определяемым методом минимального покрытия, как

$$D_\mu = \mu + 1. \quad (4)$$

Для определения индекса фрактальности μ в данной работе использовалась последовательность m вложенных разбиений, где $m = 2^n$, где $n = 0, 1, 2, 3, 4$. Каждое разбиение состояло из 2^n интервалов, содержащих 2^{4-n} экспериментальных точек. Для каждого разбиения ω_m вычислялась амплитудная вариация $V_f(\delta)$ по формуле (1),

где $K_i(\delta)$ определялась как разница между максимальным и минимальным приростом напряжения при растяжении на временном интервале $[t_{i-1}, t_i]$. По коэффициенту β уравнения регрессии $\log(V_f(\delta)) = \alpha_o + \beta \times \log(\delta)$, определенному с помощью метода наименьших квадратов, определяли индекс фрактальности и размерность минимального покрытия.

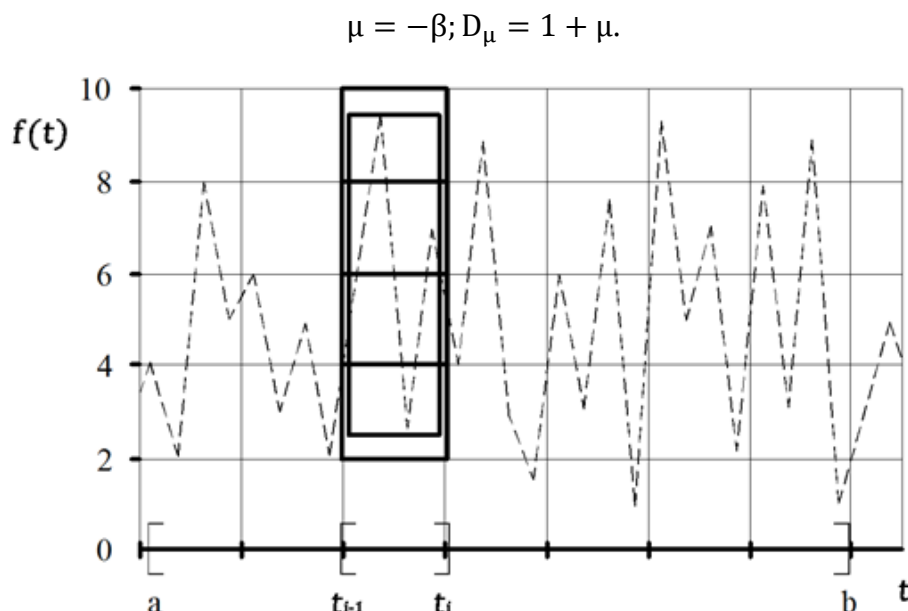


Рис. 2. Фрагмент клеточного (квадраты) и минимального (прямоугольник) покрытий графика фрактальной функции на отрезке $[t_{i-1}, t_i]$.

Анализ данных, отражающих изменение индекса фрактальности в зависимости от длительности нагружения, определяемого со смещением анализируемого участка с шагом $2^4 = 16$ точек, показал (рис. 3), что процесс разрушения (правее красной линии) характеризуется резким снижением данного показателя, варьирующегося в процессе нагружения в интервале от $0,33 \div 0,82$, до нулевых значений. При этом из анализа временных рядов известно [11 – 13], что чем выше значение μ , тем стабильнее ряд. Если $\mu < 0,5$, то ряд интерпретируют как «тренд» (период резкого движения вверх или вниз, свидетельствующего, как правило, о возникновении «критического» состояния в исследуемой системе); если $\mu > 0,5$, то как «флэт» (период относительного спокойствия). При $\mu \approx 0,5$ говорят о соответствии происходящих изменений броуновскому движению.

Согласно рисунку 3, в процессе нагружения вплоть до достижения образцом максимальных растягивающих напряжений, достигнутых через 127,83 секунды от начала испытания, наблюдается систематическое резкое снижение индекса фрактальности ниже уровня $\mu = 0,5$, что, на наш взгляд, связано с переходом системы в нестабильное состояние, связанное с формированием в структуре полимерного композита микрповреждений под действием растягивающих нагрузок. При этом до достижения композитом состояния

разрушения работоспособность образца обеспечивается, в основном, за счет передачи нагрузки на зоны без микродефектов, что выражается на графике как повышение значений μ выше уровня 0,5. Следовательно, из анализа рисунка 3 можно выявить «критические» моменты нагружения, для которых индекс фрактальности будет принимать наименьшие значения. В данном случае для анализируемого полимерного образца подобные временные координаты, соответствующие точкам бифуркации, наступали (при $\mu < 0,4$) через: 11,63; 41,02; 53,57; 59,77; 63,79; 78,80; 91,12; 101,71 и 103,14÷103,18 секунд от начала нагружения (см. точки на рис. 3). Наименьшие значения индекса фрактальности, соответствующие $\mu \approx 0,32$, зафиксированы через 81,17 и 103,15÷103,16 с (выделено точками красного цвета на рис. 3). Учитывая, что для всех исследуемых точек в области 103,14÷103,18 секунд наблюдается существенное снижение индекса фрактальности без его «восстановления» до значений 0,5 и более, все они были объединены под номером 10. Подобное последовательное падение μ в серии соседних точек свидетельствует о возникновении все больших «трудностей» при восприятии растягивающих напряжений образцом и начале процесса разуплотнения структуры, зарождении очагов локального разрушения, приводящих впоследствии к его разрушению. Числовые значения уровней напряжений и относительных деформаций в вышеперечисленных «критических» точках в абсолютных и относительных величинах (по отношению к точке достижения максимальных напряжений при растяжении) приведены в таблице 1.

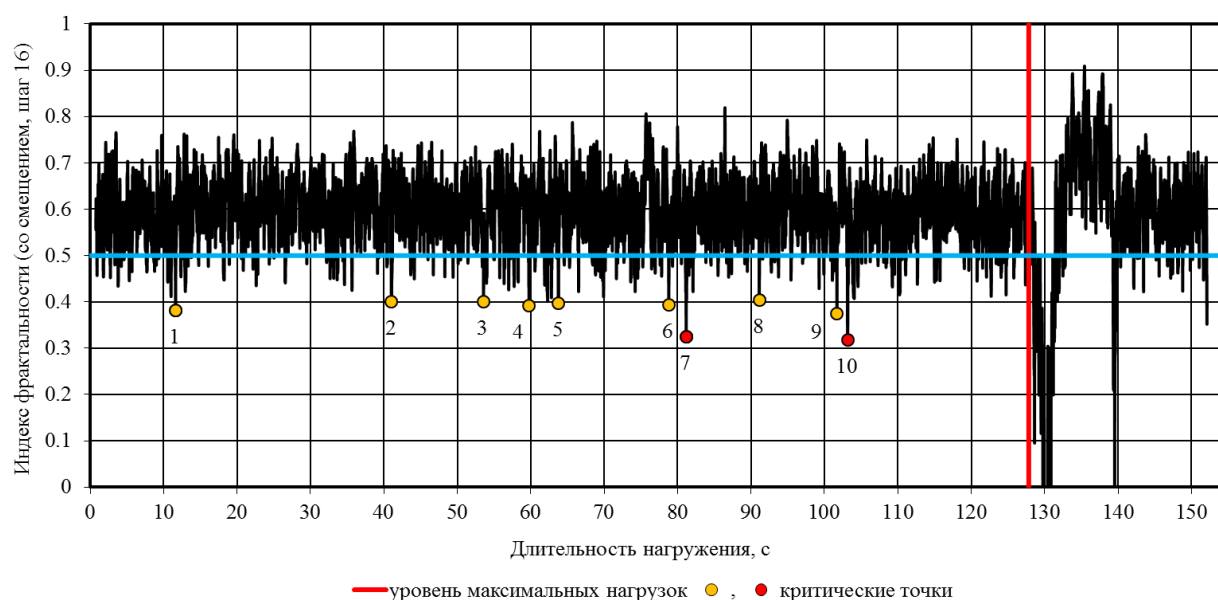


Рис. 3. Изменение индекса фрактальности кривых деформирования эпоксидного полимера при растяжении в зависимости от длительности нагружения.

**Координаты «критических» точек кривой деформирования эпоксидного полимера
при воздействии растягивающих нагрузок**

Номер «критической» точки	Индекс фрактальности μ	Параметры точек					
		абсолютные величины			относительные величины		
		$t_{\text{крит.}}$, с	$\sigma_{\text{крит.}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{крит.}}$, %	$\frac{t_{\text{крит.}}}{t_{\text{раст.}}}$, %	$\frac{\sigma_{\text{крит.}}}{\sigma_{\text{раст.}}}$, %	$\frac{\varepsilon_{\text{крит.}}}{\varepsilon_{\text{раст.}}}$, %
1	0,382	11,63	6,970	0,773	9.10	16.98	9.06
2	0,401	41,02	20,345	2,732	32.09	49.56	32.03
3	0,401	53,57	24,428	3,569	41.91	59.51	41.84
4	0,391	59,77	26,423	3,982	46.76	64.37	46.68
5	0,397	63,79	27,672	4,251	49.90	67.41	49.83
6	0,393	78,8	32,223	5,251	61.64	78.50	61.56
7	0,324	81,17	32,899	5,409	63.50	80.14	63.41
8	0,404	91,12	35,575	6,072	71.28	86.66	71.18
9	0,374	101,71	37,96	6,778	79.57	92.47	79.46
10	0,375	103,14	38,265	6,873	80.69	93.22	80.57
	0,327	103,15	38,265	6,874	80.69	93.22	80.59
	0,317	103,16	38,292	6,875	80.70	93.28	80.60
	0,355	103,17	38,309	6,875	80.71	93.32	80.60
	0,348	103,18	38,287	6,876	80.72	93.27	80.61

Предложенный подход для исследования механизма деформирования композиционных материалов при растяжении, осуществляемый на основе метода фрактального анализа кривых деформирования, регистрируемых с помощью современного испытательного оборудования с высокой частотой, позволяет получить ценную информацию о процессе накопления в его структуре микро- и макродефектов, приводящих к разрушению композитов. На наш взгляд, проведение подобных исследований на образцах полимерных композитов различного состава, а также после старения в условиях воздействия разнообразных агрессивных факторов, в том числе климатических, позволит получить ценную информацию о процессах, протекающих в структуре композиционных материалов при приложении растягивающих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 384 с.
2. Селяев В.П., Куприяшкина Л.И., Неверов В.А., Селяев П.В. Фрактальные модели разрушения бетона // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №1. – С. 11-22.

3. Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. – N.Y.: Freeman, 1983. – 480 p.
4. Федер Е. Фракталы: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
5. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А., Цыганов В. В. Определение фрактальной размерности как структурного параметра при анализе полимерных композитов // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения: Десятые Академические чтения РААСН. – Казань: Изд-во КГАСУ, 2006. – С. 73-76.
6. Хахардин А. Н., Ходыкин Е. И. Фрактальная размерность дисперсных и пористых материалов // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 62-63.
7. Селяев В. П., Низина Т. А., Ланкина Ю. А. Фрактальный анализ структуры наполненных полимерных композитов // Известия ВУЗов. Строительство. – 2007. – №4. – С. 43-48.
8. Хамидулина Д. Д., Шишкин И. В. Применение теории фрактальной геометрии в строительном материаловедении // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 2. – С. 5-8.
9. Банников М. В., Федорова А. Ю., Терехина А. И., Плехов О. А. Экспериментальное исследование фрактальных закономерностей роста усталостной трещины и диссипации энергии в ее вершине // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – №2. – С. 21-36.
10. Перцев В. Т., Козодаев С. П., Леденев А. А., Бобрышев А. Н. Топологическая оптимизация процессов формирования микроструктуры цементного камня и бетона // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2015. – №1. – С. 21-28.
11. Селяев В. П., Низина Т. А., Балыков А. С., Низин Д. Р., Блабалин А. В. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов при сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – №1. – С. 129-146.
12. Selyayev V. P., Nizina T. A., Balykov A. S., Nizin D. R., Balbalin A. V. Fractal analysis of deformation curves of disperse reinforced fine-grained concrete under compression // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2018. – No. 1-2. – Pp. 84-93.
13. Старченко Н. В. Индекс фрактальности и локальный анализ хаотических временных рядов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2005. – 122 с.
14. Dubovikov M. M., Starchenko N. S. Variation index and its applications to analysis of fractal structures // Sci. Almanac Gordon. – 2003. – №1. – Pp. 1-30.
15. Dubovikov M. M., Starchenko N. S., Dubovikov M. S. Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series // Physica A. – 2004. – №339. – Pp. 591-608.

БАЛЫКОВ А. С., НИЗИНА Т. А., КОРОВКИН Д. И.,

ВОЛОДИН В. В., КАРАБАНОВ М. О.

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ
ИЗ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ СМЕСЕЙ,
СОДЕРЖАЩИХ МЕЛКИЙ ПРИРОДНЫЙ КВАРЦЕВЫЙ ПЕСОК¹**

Аннотация. Приведены результаты исследования водопотребности мелких природных кварцевых песков и физико-механических свойств самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов с применением карбонатного наполнителя-микрокальцита. Разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов классов прочности на сжатие В20÷В90 из самоуплотняющихся смесей класса удобоукладываемости SF1.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, высоконаполненная самоуплотняющаяся смесь, карбонатный наполнитель, мелкий песок, распыл, прочностные показатели.

BALYKOV A. S., NIZINA T. A., KOROVKIN D. I.,

VOLODIN V. V., KARABANOV M. O.

**MODIFIED FINE-GRAINED CONCRETES
FROM HIGH-FILLED SELF-COMPACTING MIXTURES
CONTAINING FINE NATURAL QUARTZ SAND**

Abstract. The results of the study of water demand of fine natural quartz sands and physical and mechanical properties of self-compacting fine-grained concretes with the use of carbonate filler-microcalcite are given. The compositions of modified fine-grained concretes of compressive strength class C20÷C90 from self-compacting mixtures of workability class SF1 are developed.

Keywords: fine-grained concrete, high-filled self-compacting mixture, carbonate filler, fine sand, blurry, strength indicators.

В настоящее время одним из приоритетных стратегических направлений строительного материаловедения является разработка энергоэффективных модифицированных цементных бетонов, отличающихся комплексом высоких физико-технических характеристик [1–5]. Общей особенностью современных модифицированных

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-29-12036 «Разработка принципов управления фазовым составом и минерало-морфологическим состоянием структуры модифицированного цементного камня для повышения сопротивления высокопрочных мелкозернистых и легких бетонов и фибробетонов климатическим и эксплуатационным воздействиям».

цементных композитов является высокая прочность (от 60÷100 МПа и выше), причем прочностные показатели возрастают с уменьшением содержания и размеров заполнителя, достигая максимальных значений при формировании высокопрочной тонкозернистой структуры, отличающейся высокой однородностью и отсутствием опасности разрушения по зоне контакта «крупный заполнитель – цементный камень» [6]. Эффективность мелкозернистой структуры при создании высокопрочных цементных бетонов подтверждена результатами авторских исследований [7–10].

В развитии технологии высокопрочных тяжелых и мелкозернистых бетонов решающую роль сыграли сформированные в результате многочисленных исследований и подтвержденные практикой научные основы модифицирования цементных систем химическими и активными минеральными добавками [11–16]. Применение эффективных индивидуальных добавок (суперпластификаторов на поликарбоксилатной и полигликолиевой основах, активных пуццолановых добавок – микрокремнеземов, дегидратированных каолинов и высокодисперсных зол, расширяющих добавок, реологически активных наполнителей из плотных горных пород и др.) и их комплексов стало ключом к решению многих технологических задач бетоноведения, в том числе – получению модифицированных цементных композитов повышенной прочности из самоуплотняющихся смесей [6, 17–19].

К самоуплотняющимся относят бетонные смеси с высокими показателями удобоукладываемости: расплыв стандартного конуса свыше 55-60 см при сниженных значениях водоцементного отношения до 0,35-0,4 и менее. Отличительной особенностью рецептуры самоуплотняющихся тяжелых или мелкозернистых бетонов с крупными песками является повышенное содержание реологически активной суспензионной составляющей, количество которой в различных бетонах колеблется от 40 до 50% [17–19]. Увеличение доли водно-дисперсной суспензии достигается введением тонкодисперсных порошков из горных пород осадочного, вулканического и метаморфического происхождения в количестве до 100÷150% от массы цемента, которые совместимы с известными пластификаторами и являются реологически активными в смеси с цементом [20] (известняк, мрамор, доломит, молотый кварцевый песок и др.). Однако вопросы получения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей с применением распространенных мелких природных кварцевых песков с модулем крупности менее 2,0 малоизучены, особенно в малоцементных смесях с расходом вяжущего до 400 кг/м³, самоуплотнения которых невозможно достигнуть при минимуме воды и без расслоения при указанных степенях наполнения цементных систем вследствие высокой межзерновой пустотности и водопотребности указанных мелких

заполнителей, а также низкой эффективности пластификаторов в подобных смесях вне зависимости от их дозировки [21].

В данной работе приведены результаты исследования водопотребности мелких природных кварцевых песков, а также проанализирована возможность получения на их основе составов самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей класса по удобоукладываемости SF1.

Водопотребность мелких природных кварцевых песков определялась по методике Б.Г. Скрамтаева и Ю.М. Баженова [22], основанной на подборе смесей одинаковой подвижности при сравнительных испытаниях цементного теста и растворной смеси с мелким заполнителем. Для определения водопотребности песка (V_n) на начальном этапе устанавливалось водосодержание цементного теста ($(B/C)_ц$), при котором оно имеет расплыв конуса на встряхивающем столике (ГОСТ 310.4) около 170 мм, что приблизительно соответствует его нормальной густоте (ГОСТ 310.3). Затем определялось водоцементное отношение растворной смеси состава $C/P=1/2$ на исследуемом песке ($(B/C)_p$), при котором она имеет тот же расплыв конуса на встряхивающем столике (170 мм). Водопотребность песка (%) вычислялась по формуле:

$$V_n = \frac{(B/C)_p - (B/C)_ц}{2} \cdot 100\%. \quad (1)$$

В качестве вяжущего для приготовления растворной смеси использовался портландцемент класса ЦЕМ I 32,5Б с показателями нормальной густоты цементного теста $НГ = 26,5\%$ и, соответственно, водоцементного отношения $(B/C)_ц = 0,265$; в качестве мелкого заполнителя – природный кварцевый песок Новостепановского карьера Ичалковского района Республики Мордовия с модулем крупности $M_{кр} = 1,6$ и содержанием пылеватых и глинистых частиц 1,6%. В результате фракционирования песка и отбора фракций менее 0,63 мм модуль крупности изменялся в диапазоне $M_{кр} = 1,4 \div 1,6$. Данный вид мелкого заполнителя использовался в двух модификациях: в виде отобранной фракции менее 0,63 мм с $M_{кр} = 1,4$ и средним размером зерна $d_{ср} = 0,23$ мм (П1); в естественном сложении с размером зерна не более 5 мм, $d_{ср} = 0,29$ мм и $M_{кр} = 1,6$ (П2).

Результаты определения водопотребности исследуемых видов песка приведены в таблице 1. Как видно из представленных данных, природный кварцевый песок Новостепановского карьера имеет водопотребность в диапазоне $V_n = 7,4 \div 8,3\%$ с повышением данного показателя при увеличении средней дисперсности и уменьшении модуля крупности песка при его фракционировании.

Результаты исследования водопотребности мелких природных кварцевых песков

Вид применяемого песка	Маркировка песка	Дисперсность и модуль крупности песка	(В/Ц) _р , отн. ед.	В _п , %
природный кварцевый песок Новостепановского карьера	П1	фракция менее 0,63 мм, $d_{ср} = 0,23$ мм и $M_{кр} = 1,4$	0,430	8,3
	П2	естественное сложение с размером зерна не более 5 мм, $d_{ср} = 0,29$ мм и $M_{кр} = 1,6$	0,413	7,4

На следующем этапе осуществлялся подбор составов самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей с применением карбонатного наполнителя – микрокальцита КМ100 (МКМ) компании ООО «Полипарк». Для повышения содержания тонкодисперсных компонентов и объемной концентрации вяжущего помимо микрокальцита использовались три вида минеральных добавок – микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85 (МК) производства АО «Кузнецкие ферросплавы»; высокоактивный метакраолин белый (ВМК) производства ООО «Мета-Д»; добавка «Пенетрон Адмикс» (Адмикс) производства ООО «Завод гидроизоляционных материалов «Пенетрон». В качестве пластифицирующей добавки применялся поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 5581 F (СП) производства BASF Construction Solutions (Trostberg, Германия).

По результатам исследования разработаны составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей класса по удобоукладываемости SF1 (диаметр расплыва из конуса Хегерманна не менее 260÷280 мм, осадка и расплыв стандартного конуса Абрамса более 25÷25,5 см и 500÷550 мм соответственно) с мелким природным песком П1 (табл. 1), расходами портландцемента ЦЕМ I 32,5Б (Ц) в диапазоне от 239 до 739 кг/м³ бетонной смеси, долей МКМ – 45÷321% от массы портландцемента, содержанием СП Melflux 5581 F и воды – соответственно 0,7% и 0,202÷0,218 отн. ед. от массы смеси «Ц + МКМ». Данные самоуплотняющиеся смеси являются высоконаполненными системами, отличаются повышенным содержанием тонкодисперсных реологически активных компонентов (Ц + МКМ) и реологически активной суспензионной составляющей (Ц + МКМ + минеральная добавка + вода) – 340÷360 и 580÷600 л/м³ соответственно, обеспечивающим достаточную прослойку между частицами мелкого песка.

По результатам экспериментальных исследований (табл. 2) зафиксированы повышенные значения плотности модифицированных мелкозернистых бетонов из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей с песком П1 – 2320÷2393 кг/м³ в нормальных влажностных условиях. При этом прочностные показатели в возрасте 28 суток

исследуемых цементных композитов изменяются в широком диапазоне: соответственно при изгибе – 5,3÷14,9 МПа; при сжатии – 28,3÷115,8 МПа.

Исследуемые составы модифицированных мелкозернистых бетонов из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей отличаются высокими темпами набора прочности: предел прочности при изгибе в возрасте 1 и 7 суток соответственно составил 28÷66 и 75÷86%, а при сжатии – 28÷44 и 71÷81% от прочности в возрасте 28 суток. По результатам анализа данных таблицы 2 установлена возможность получения высокопрочных мелкозернистых бетонов без активных минеральных добавок при расходе портландцемента 739 кг/м³: состав №1 с пределом прочности при сжатии и изгибе в возрасте 28 суток – 92,5 и 12,3 МПа соответственно.

Таблица 2

Составы и физико-механические свойства модифицированных мелкозернистых бетонов из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей с мелким песком П1

Составы Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
Рецептурно-технологические показатели							
МКМ / Ц, отн. ед.	0,45	0,45	0,45	0,45	1,11	1,63	3,21
Ц, кг/м ³	701÷739				239÷485		
П / Ц, отн. ед.	1,50	1,50	1,50	1,50	2,23	2,92	4,68
Добавка (Д), % от массы (Ц + Д)	-	10 (ВМК)	10 (Адмикс)	10 (МК)	10 (ВМК)	-	-
СП, % от массы (Ц + МКМ)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
В / Ц, отн. ед.	0,29	0,30	0,32	0,32	0,44	0,57	0,89
Расплыв из конуса Хегерманна, мм	295	260	280	280	260	290	300
Физико-механические свойства в возрасте 28 суток							
Плотность, кг/м ³	2393	2343	2320	2367	2320	2323	2344
Прочность при изгибе, МПа	12,3	12,8	10,6	14,9	9,9	7,4	5,3
Прочность при сжатии, МПа	92,5	104,2	82,7	115,8	73,8	47,5	28,3

По результатам исследования физико-механических свойств модифицированных мелкозернистых бетонов из самоуплотняющихся смесей с повышенным расходом портландцемента (701÷739 кг/м³) зафиксировано, что введение в рецептуру активных минеральных добавок микрокремнезема и метакеолина приводит к приросту прочностных показателей композитов. В частности, исследуемые прочностные характеристики мелкозернистых бетонов с МК и ВМК составов №2 и 4 выше аналогичных показателей немодифицированных активными минеральными добавками композитов контрольного состава №1 при близких расходах портландцемента: до 21 и 25% при изгибе и сжатии соответственно.

Введение в рецептуру добавки Адмикс (состав №3) способствует некоторому снижению прочностных показателей мелкозернистых бетонов в проектном возрасте (28 суток) по сравнению с композитами контрольного состава №1 при близких расходах портландцемента – на 14 и 11% при изгибе и сжатии соответственно. Данный эффект можно объяснить несколько повышенной водопотребностью мелкозернистых бетонных смесей с данной минеральной добавкой (табл. 2) и особенностью структуры полученных на их основе композитов (пористостью, фазовым составом цементного камня).

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов классов прочности на сжатие B20÷B90 из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей с расходом портландцемента 239÷739 кг/м³ и водосодержанием 212÷226 л/м³, в том числе высокопрочных класса B55 и выше с расходом портландцемента 485÷739 кг/м³, включающие карбонатный наполнитель, СП Melflux 5581 F, минеральные добавки МК, ВМК-б и Адмикс (при необходимости), мелкий природный кварцевый песок с модулем крупности 1,4, со следующими показателями качества: плотность в нормальных влажностных условиях в возрасте 28 суток – 2320÷2393 кг/м³; прочность при изгибе и сжатии в возрасте 28 суток – 5,3÷14,9 и 28,3÷115,8 МПа соответственно. Использование подобных самоуплотняющихся смесей в практике реального строительства будет способствовать внедрению ресурсосберегающих, энергосберегающих и более экологически чистых технологий за счет сокращения наращивания материало- и энергоемкого производства портландцемента, снижения выбросов вредных газов в атмосферу, уменьшения расхода энергии и топлива на укладку и формование бетонных смесей, снижения объемов авто- и железнодорожных перемещения сырья и замены дорогостоящих привозных заполнителей дешевыми местными песками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
2. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // Строительные материалы. – 2016. – № 1-2. – С. 96-103.
3. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. – М.: Навруз, 2010. – 258 с.
4. Aitcin P.C. High-performance concrete. – London: T&F e-Library, 2004. – 591 p.

5. Nawy E.G. Fundamentals of high-performance concrete. – New-York: J. Wiley and Sons, 2001. – 441 p.
6. Фаликман В.Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – №2. – С. 78-84.
7. Nizina T.A., Balykov A.S. Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – No. 2. – Pp. 13-25. DOI: 10.5862/MCE.62.2.
8. Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S., Pankin N.A. Fine-grained fibre concretes modified by complexed nanoadditives // International Journal of Nanotechnology. – 2017. – Vol. 14. – Nos. 7/8. – Pp. 665-679.
9. Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fiber concretes modified on different scale levels // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. – 2017. – Vol. 9. – No. 2. – Pp. 43-65.
10. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No. 4. – Pp. 73–83. DOI: 10.18720/MCE.72.9.
11. Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. – 2006. – №10. – С. 8-12.
12. Фаликман В.Р. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 2 (28). – С. 86-90.
13. Селяев В.П., Низина Т.А., Балбалин А.В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 31 (50), Ч. 2. – С. 156-163.
14. Кирсанова А.А., Крамар Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакеолина для цементных бетонов // Строительные материалы. – 2013. – №10. – С. 54-56.
15. Калашников В.И., Москвин Р.Н., Беякова Е.А., Беякова В.С., Петухов А.В. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – №2 (22). – С. 113-118.
16. Тараканов О.В., Калашников В.И. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения // Известия КГАСУ. – 2017. – №1 (39). – С. 223-229.

17. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2003. – Vol. 1. – No. 1. – Pp. 5-15.
18. De Schutter G., Bartos P., Domone P., Gibbs J. Self-compacting concrete. – New-York: Taylor & Francis Group, 2008. – 296 p.
19. EFNARC. The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use. – UK: Farnham, 2005. – 68 p.
20. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. – 2008. – №10. – С. 4-6.
21. Балыков А.С. Модифицированные мелкозернистые бетоны и фибробетоны на основе высоконаполненных самоуплотняющихся смесей: дисс. ... канд. тех. наук. – Казань, 2018. – 228 с.
22. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: АСВ, 2003. – 500 с.