



eISSN 2311-2468
Том 11, № 7. 2023
Vol. 11, no. 7. 2023

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



УТКИНА В. Н., АНТИПОВ А. С., АНТИПОВА Д. Р.

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНОГО МОНОЛИТНОГО ЗДАНИЯ
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА**

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ результатов расчета конструкций высотного монолитного здания с учетом нелинейных свойств железобетона. Создание модели конструктивной системы и расчеты выполнены в ПК МОНОМАХ-САПР.

Ключевые слова: высотное офисное здание, монолитная конструктивная система, программный комплекс МОНОМАХ-САПР, инженерная нелинейность, расчет, напряженно-деформированное состояние, несущие конструкции.

UTKINA V. N., ANTIPOV A. S., ANTIPOVA D. R.

**INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES
OF A HIGH-RISE MONOLITHIC BUILDING TAKING INTO ACCOUNT
NONLINEAR PROPERTIES OF REINFORCED CONCRETE**

Abstract. This article presents a comparative analysis of the results of calculating the structures of a high-rise monolithic building taking into account the nonlinear properties of reinforced concrete. The formation of a model of a constructive system and calculations are performed in a MONOMAKH-CAD PC.

Keywords: high-rise office building, monolithic structural system, MONOMACH-CAD software package, engineering nonlinearity, calculation, stress-strain state, load-bearing structures.

Для обеспечения надежности и безопасности высотных монолитных зданий необходимо в расчетах принимать во внимание изменение характеристик материалов железобетонных конструкций при эксплуатации. Это приводит к перераспределению усилий, значительному изменению перемещений и напряжений по сравнению с линейно-упругим расчетом. Нелинейные жесткости элементов определяются с учетом фактически установленного армирования, возможного образования трещин и развития неупругих деформаций в бетоне и арматуре. В сводах правил Российской Федерации рекомендуется проводить расчет железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности [1–3].

Компьютерные технологии в наши дни развиваются стремительно, новейшие программные комплексы позволяют выполнять различные сложные расчеты на основе пространственных моделей зданий или сооружений. Практически во всех современных расчетных комплексах (ANSYS, STARK, SCAD, ЛИРА, МОНОМАХ и других) используется метод конечных элементов (МКЭ) для определения перемещений, усилий и напряжений в

несущих конструкциях, реализуются расчеты с учетом нелинейных свойств материалов и изменения их во времени. Проведение численных экспериментов для исследования и оценки действительного напряженно-деформированного состояния строительных конструкций является актуальным и возможным в настоящее время [4–10].

Цель работы – выполнить расчет и анализ напряженно-деформированного состояния конструкций высотного офисного здания с учетом нелинейных свойств материалов. Основные задачи: сформировать конструктивную модель высотного здания в специализированном программном комплексе МОНОМАХ-САПР; выполнить общие расчеты модели в линейной и нелинейной постановке; произвести анализ и сравнение результатов.

Проектируемое высотное здание предназначено для размещения офисов, имеет 33 наземных и 2 подземных этажа. Форма в плане симметричная, близка к кругу, максимальные размеры в осях $44,00 \times 44,00$ м. Высота здания от планировочной отметки проезда до нижней границы оконного проема верхнего этажа составляет 116,730 м.

На подземных этажах находятся технические помещения. На 1-ом этаже расположен вестибюль, офисы, пункт пожаротушения, помещение охраны; на 2-ом – кафе и ресторан с панорамным видом; на 3-ем – конференц-залы. Этажи с 4-го по 12-й, 14 – 22, 24 – 32 занимают офисные помещения; 13, 23 и 33 этажи – технические. Высота минус 2-го этажа – 4,4 м, минус 1-го – 3,9 м, 1-го – 4,2 м, остальных этажей – 3,6 м.

Уровень ответственности здания – 1 (повышенный) согласно ГОСТ 27751-2014. Несущие конструкции запроектированы в монолитном железобетоне. Конструктивная система здания каркасно-стенная. Несущими элементами являются стены ядра жесткости, колонны и диски перекрытий, которые при совместной работе обеспечивают геометрическую неизменяемость, общую и местную устойчивость и восприятие всех вертикальных и горизонтальных нагрузок. Фундамент проектируется в виде сплошной монолитной железобетонной плиты.

Материалы и размеры сечений монолитных железобетонных конструкций принимаются по результатам расчетов на восприятие постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок и в соответствии с рекомендациями сводов правил СП 63.13330.2018 и СП 267.1325800.2016 [1; 2]. Фундаментная плита толщиной 3000 мм изготовлена из тяжелого бетона класса по прочности на сжатие В40. Колонны имеют сечения круглой формы, их диаметры составляют 500 и 1000 мм, выполнены из тяжелого бетона классов В35 и В45. Наружные стены подвала и внутренние несущие стены толщиной 400 мм, а также стены диафрагм жесткости толщиной 600 мм – монолитные железобетонные из бетона класса В35. Плиты перекрытия плоские толщиной 220 мм и плита покрытия толщиной 300 мм – из бетона класса В30. Рабочая арматура всех конструкций – класса А400.

Формирование пространственной модели несущей конструктивной системы высотного здания выполняется в программе КОМПОНОВКА специализированного комплекса МОНОМАХ-САПР [11]. Все геометрические параметры, необходимые для создания модели, принимаются согласно конструктивной схеме здания. Последовательно задавая в рабочем поле программы колонны, стены, плиты перекрытий и отверстия в них, создаем модели этажей. Копируем типовые этажи и корректируем их при необходимости. План типовых этажей представлен на рисунке 1.

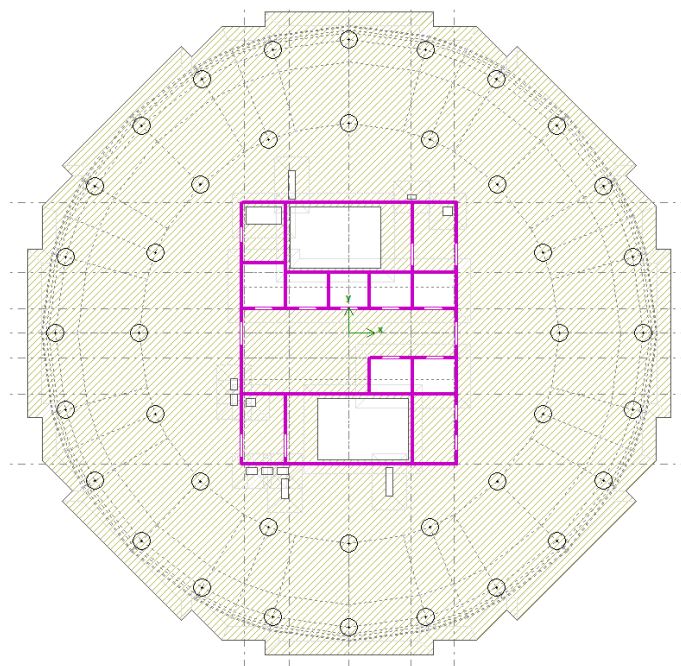


Рис. 1. План типовых этажей.

При проектировании здания задаются постоянные и временные нагрузки, которые действуют на эксплуатационной стадии. Состав и значения нагрузок и воздействий, а также коэффициенты надежности по нагрузке и назначению определяются по СП 20.13330.2016 [12] и в соответствии с техническим заданием.

Нагрузки от собственного веса несущих конструкций формируются автоматически по проектным размерам и объемному весу материалов. Равномерно распределенная нагрузка на всю площадь перекрытия задается в момент создания плиты. Внешние ненесущие стены в расчете учитывались в виде линейной нагрузки на перекрытия.

Полученная пространственная модель конструктивной системы здания показана на рисунке 2. Расчетная схема состоит из конечных элементов (КЭ) различного типа, соединённых между собой в узлах (рис. 3). Колонны и балки представлены стержневыми конечными элементами, стены и плиты – плоскими элементами изгибного состояния.

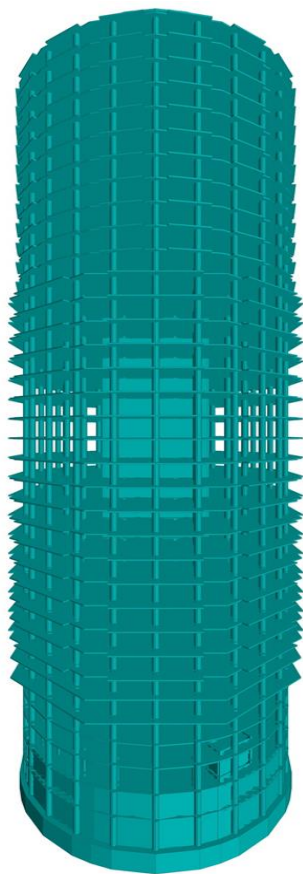


Рис. 2. 3D-модель конструктивной системы здания.

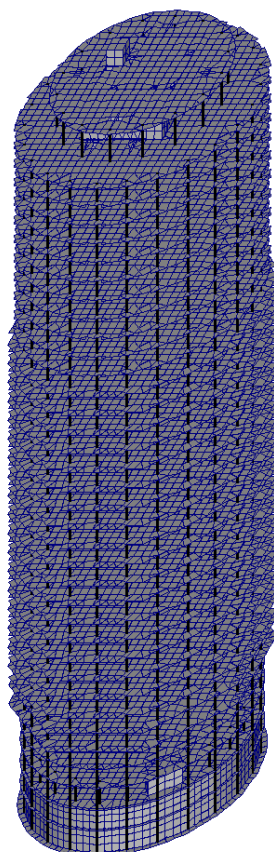


Рис. 3. Расчетная конечно-элементная схема здания.

В линейных задачах зависимости между нагрузками и перемещениями, напряжениями и деформациями описываются с помощью закона Гука. Для решения физически и геометрически нелинейных задач, а также задач с наличием конструктивной нелинейности и предварительного напряжения необходимо производить нелинейные расчеты.

В ПК МОНОМАХ-САПР для учета нелинейной работы бетона и арматуры конструкции реализован метод «инженерная нелинейность» [6; 7]. Ход решения состоит из нескольких стадий. На первом этапе формируется определяющая расчетная комбинация, при этом учитываются заданные коэффициенты к нагрузкам постоянного, длительного и кратковременного загрузений. Выполняется статический расчет и вычисление внутренних усилий в элементах схемы, на основании которых происходит автоматический подбор арматуры. Затем производится расчет в несколько итераций – по результатам армирования, полученных на предыдущем этапе, вычисляются приведенные жесткостные характеристики элементов с учетом известных диаграмм деформирования материалов, выполняется расчет и вычисляются внутренние усилия в элементах схемы, и снова происходит автоматический подбор арматуры. По результатам армирования, полученным на последней итерации, вычисляются приведенные жесткостные характеристики, которые считаются окончательными. После этого проводится завершающий расчет на все загрузения.

Расчет конструктивной системы высотного здания выполняем с учетом линейных (упругих) и нелинейных (неупругих) жесткостей железобетонных элементов. Рассмотрим также различные упрощенные методы для оценки работы конструкций, рекомендуемые в действующих сводах правил [1–3].

В соответствии с п. 6.1.15 СП 63.13330.2012 значение модуля деформаций бетона при продолжительном действии нагрузки определяется по формуле

$$E_{b,\tau} = E_{b0} / (1 + \varphi_{b,cr}) ,$$

где $\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести бетона, принимаемый по п. 6.1.16; E_{b0} – начальный модуль упругости бетона [1].

Согласно п. 8.2.4.15 СП 267.1325800.2016 допускается проводить линейный расчет здания при пониженных жесткостях железобетонных элементов. Значение модуля упругости материалов конструкций принимается с понижающими коэффициентами: 0,6 – для вертикальных сжатых элементов; 0,3 и 0,2 – для плит перекрытий (покрытий) при отсутствии и наличии трещин соответственно [2].

На рисунках 4 – 7 представлены результаты определения вертикальных и горизонтальных перемещений при линейном и нелинейном расчетах конструктивной системы здания на основное сочетание нагрузок. Перемещения увеличиваются с ростом высоты

здания. Максимальные значения перемещений по X и Z при нелинейном расчете больше в 1,5 и 1,05 раза соответственно.

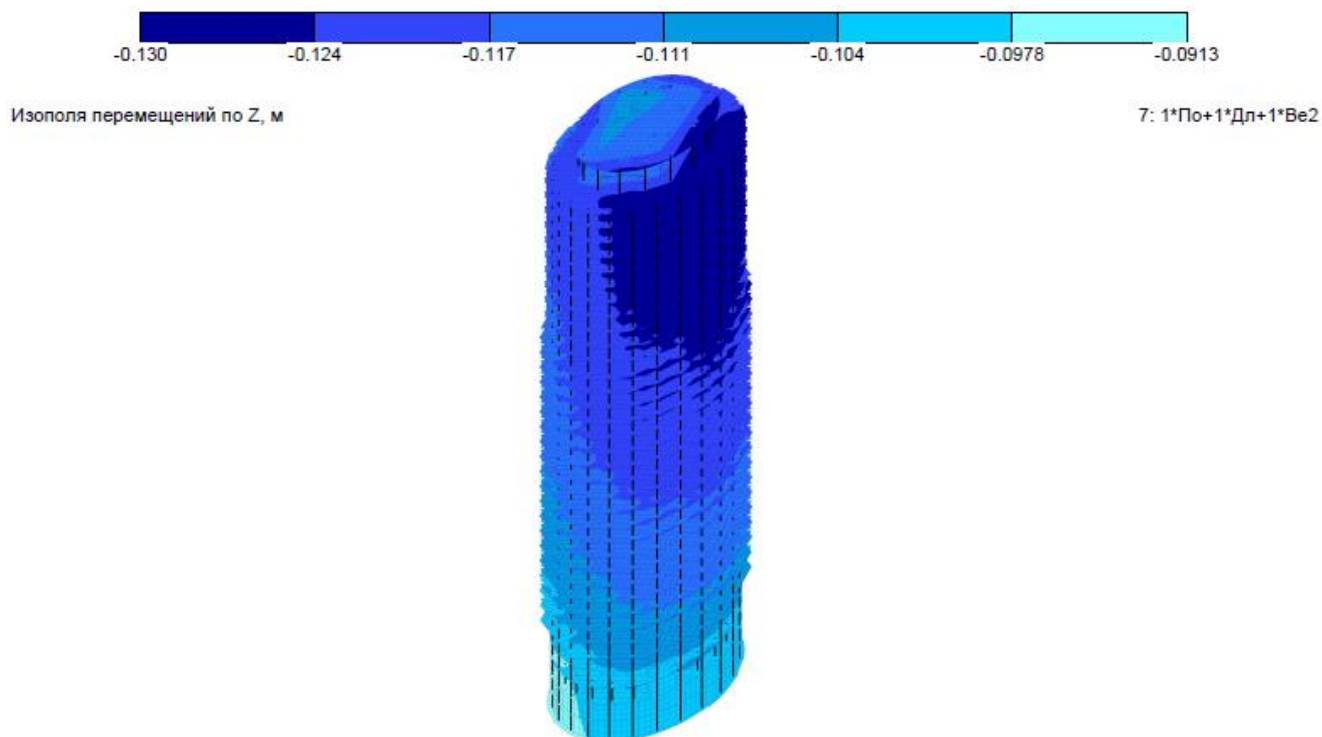


Рис. 4. Изополя перемещений по оси Z от основного сочетания нагрузок при линейном расчете, м.

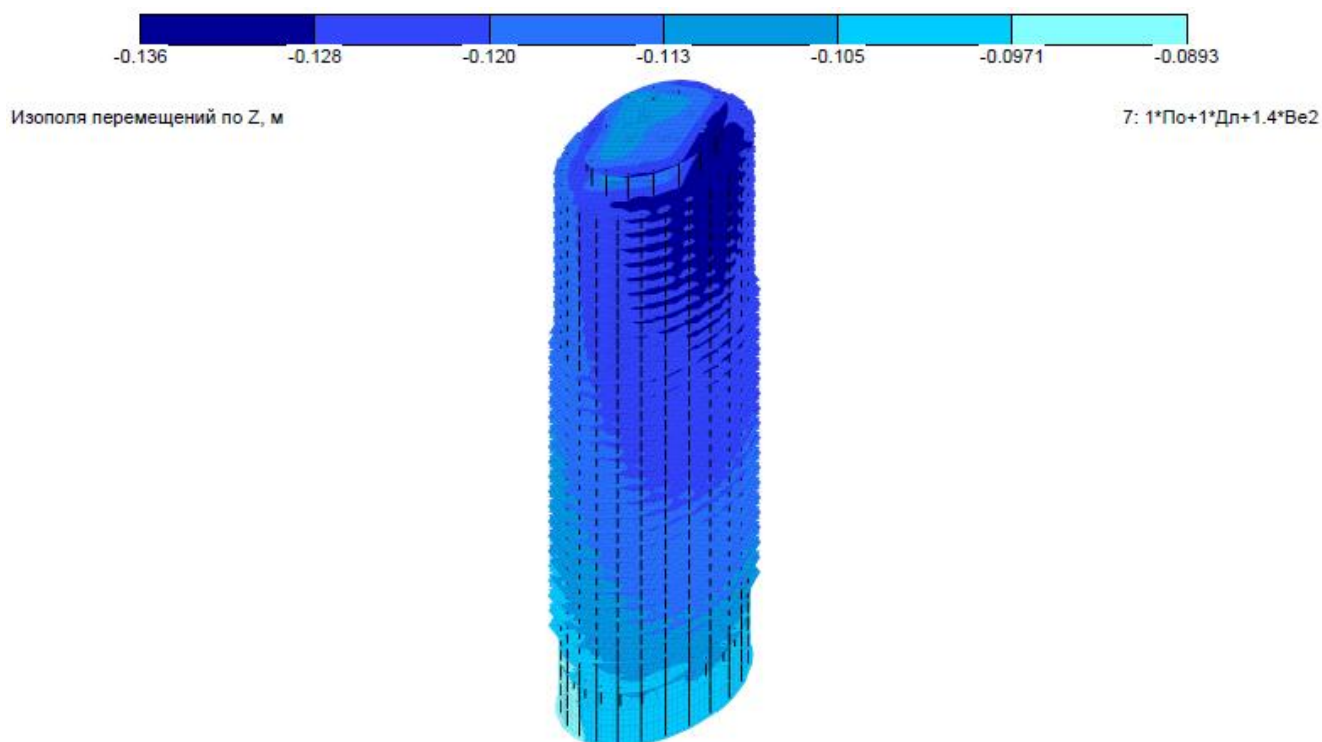


Рис. 5. Изополя перемещений по оси Z от основного сочетания нагрузок при нелинейном расчете, м.

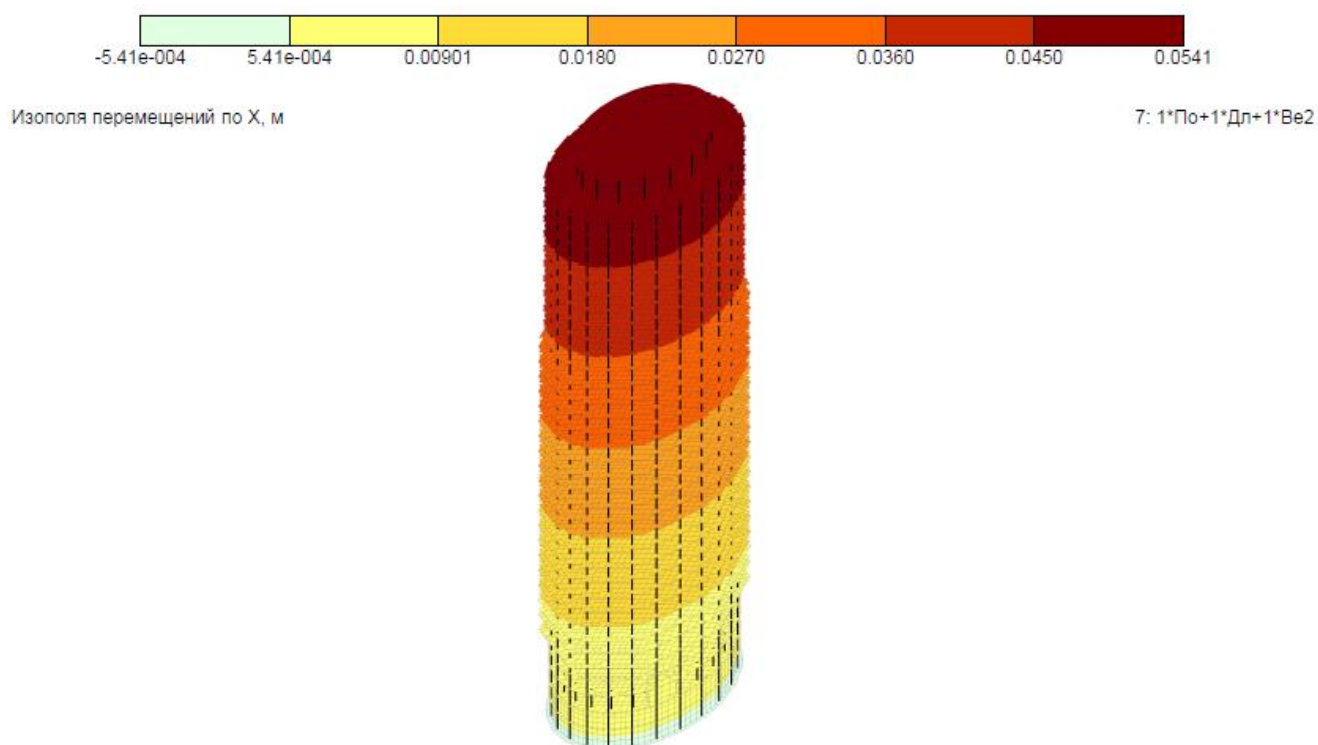


Рис. 6. Изополю перемещений по оси X от основного сочетания нагрузок при линейном расчете, м.

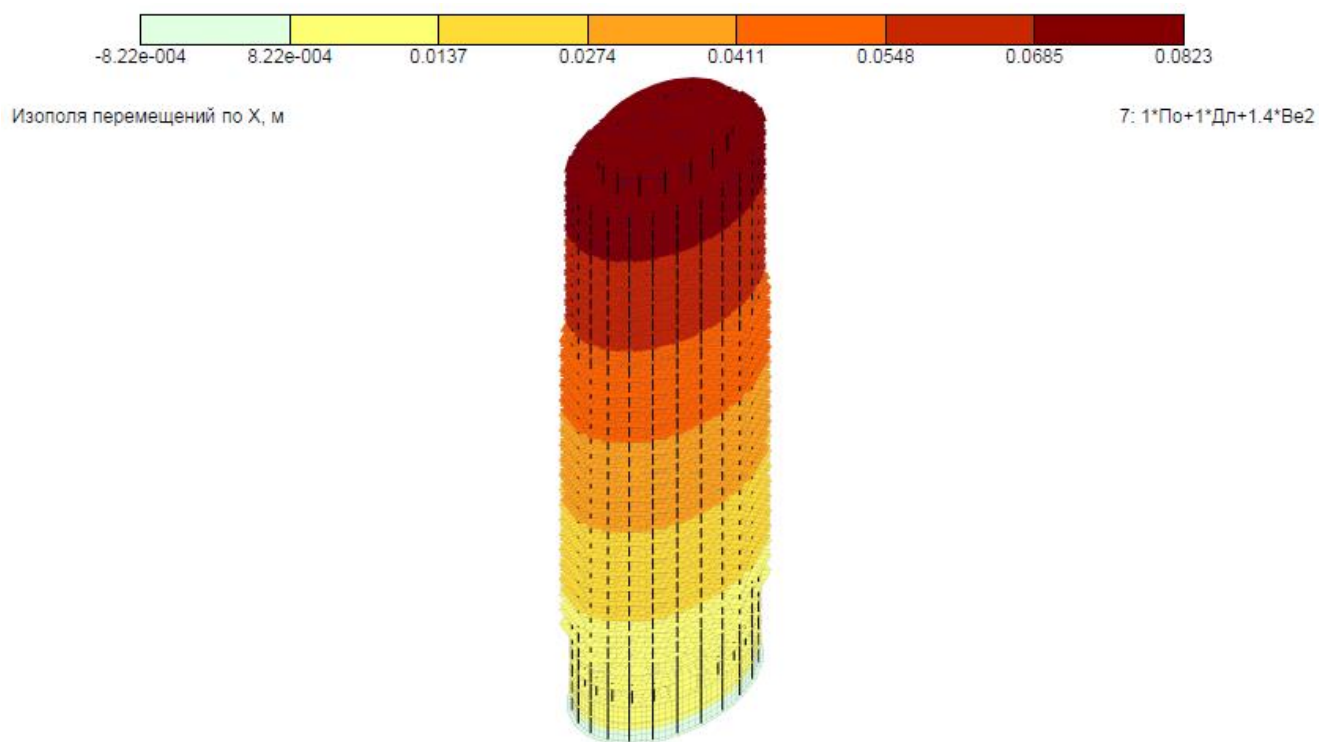


Рис. 7. Изополю перемещений по оси X от основного сочетания нагрузок при нелинейном расчете, м.

Результаты определения напряженно-деформированного состояния плит перекрытий, полученные на основе линейных и нелинейных расчетов конструктивной системы здания,

представлены на рисунках 8 – 10. Здесь введены следующие обозначения: ЛР – линейный расчет; НР – нелинейный расчет; ЛР, СП 267 и ЛР, СП 63 – линейные расчеты при пониженных значениях модуля упругости бетона в соответствии с СП 267.1325800.2016 и СП 63.13330.2012.

На рисунке 8 показаны графики изменения максимальных значений вертикальных перемещений для плит перекрытий от минус 2 до 33 этажей.

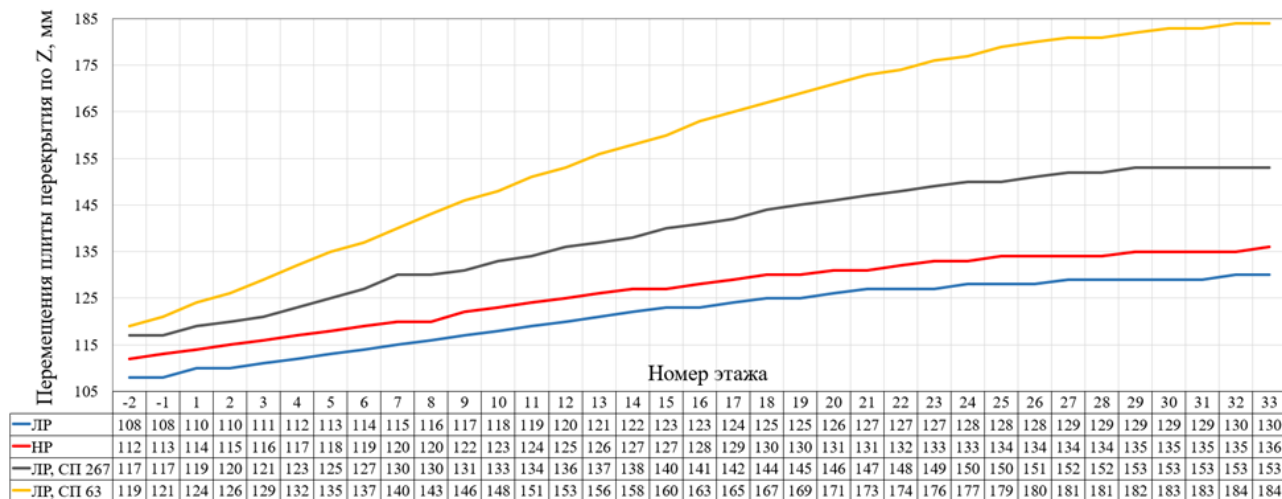


Рис. 8. Графики максимальных перемещений плит перекрытий при различных методах расчета.

Линии перемещений имеют плавно нарастающий характер с увеличением этажности, вид зависимостей одинаковый при различных методах расчета. Основные изменения наблюдаются лишь в значениях перемещений, при нелинейном расчете (НР) значения максимальных перемещений больше, чем при линейном расчете (ЛР). Графики максимальных перемещений при упрощенных расчетах по сводам правил (ЛР, СП 267 и ЛР, СП 63) находятся значительно выше. Экстремальные значения перемещений плит перекрытий при различных расчетах равномерно увеличиваются с этажностью здания, максимальные значения наблюдаются на верхних этажах.

Снижение модуля упругости бетона согласно рекомендациям СП 63.13330.2012 и СП 267.1325800.2016 [1; 2] существенно сказывается на результатах перемещений конструктивной системы в целом.

На рисунках 9, 10 представлены графики изменения экстремальных значений опорных и пролетных изгибающих моментов M_x в плитах перекрытий при расчетном сочетании нагрузок (постоянная + длительная + кратковременная + ветер-2).

Анализируя графики, можно отметить, что абсолютная величина опорных и пролетных моментов значительно меньше при нелинейном расчете. Моменты увеличиваются с повышением этажа здания. Разница в значениях опорных и пролетных моментов для плиты

перекрытия 5-го этажа, полученных при линейном и нелинейном расчетах, составляет 28,4 и 15,7% соответственно. Для плиты перекрытия 30-го этажа отклонение значений опорных моментов равно 52,6%, а пролетных – 45,6%.

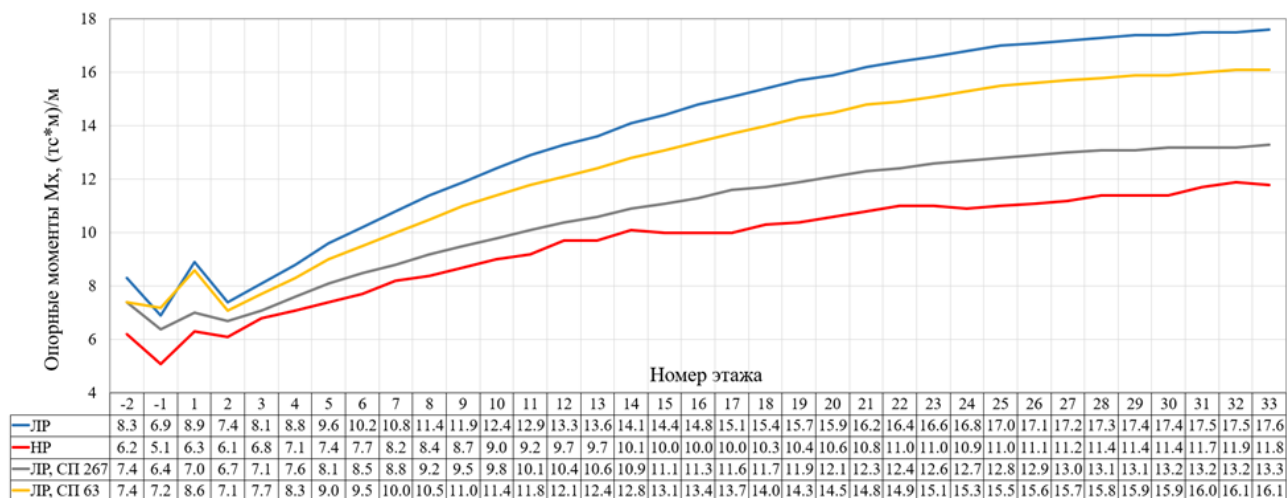


Рис. 9. Сравнение опорных моментов M_x плит перекрытий при различных расчетах.

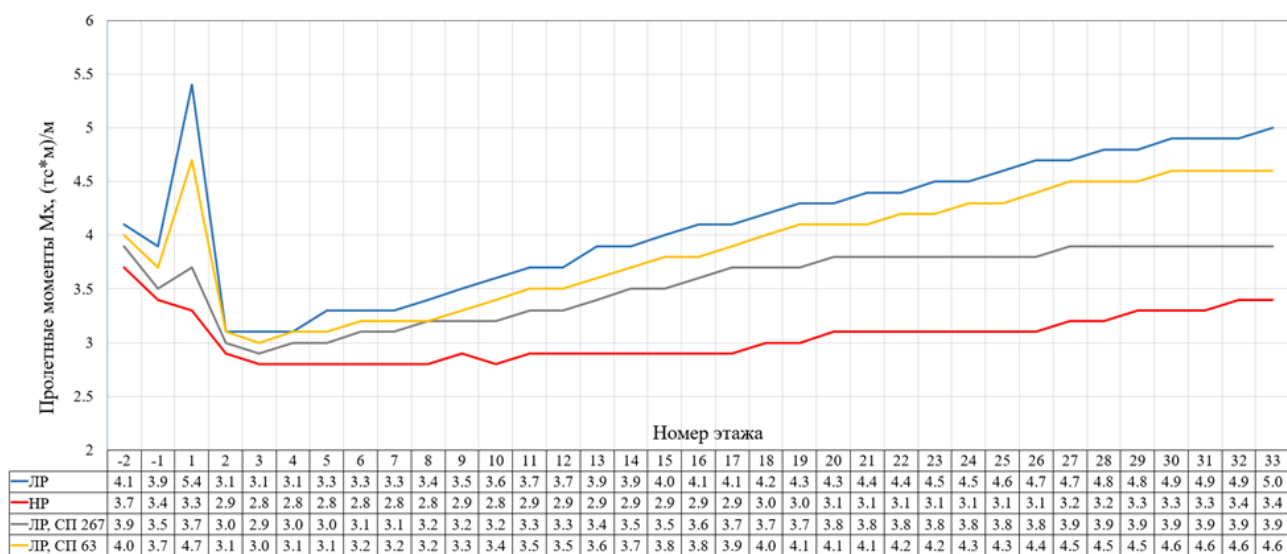


Рис. 10. Сравнение пролетных моментов M_x плит перекрытий при различных расчетах.

Значения изгибающих моментов, полученные по результатам упрощенных расчетов, находятся между графиками линейного и нелинейного расчета. Увеличение моментов в начале графика объясняется приложением большей нагрузки на плиту перекрытия 1-го этажа. Сравнение основных параметров конструктивной системы при линейном и нелинейном расчетах с допустимыми нормативными значениями представлено в таблице.

Сравнение основных параметров конструктивной системы с допустимыми значениями

Наименование параметра	Полученное значение (ЛР)	Полученное значение (НР)	Предельно допустимое значение	Наименование источника
Горизонтальное перемещение верха конструкции по X, см	5,410	8,230	25,020	СП 267.1325800.2016; п.8.2.4.15
Горизонтальное перемещение верха конструкции по Y, см	4,520	6,720	25,020	СП 267.1325800.2016; п.8.2.4.15
Перекося этажных ячеек, см	0,050	0,076	1,200	СП 267.1325800.2016; п.8.2.4.16
Прогиб плиты перекрытия 1-го этажа, см	0,600	0,800	3,670	СП 20.13330.2016, приложение Д, таблица Д.1
Прогиб плиты перекрытия 15-го этажа, см	1,400	1,600	3,670	СП 20.13330.2016, приложение Д, таблица Д.1
Прогиб плиты перекрытия 32-го этажа, см	1,600	2,000	3,230	СП 20.13330.2016, приложение Д, таблица Д.1
Средняя осадка фундамента, см	9,840	9,830	15,000	СП 22.13330.2016, приложение Г, таблица Г.1
Относительная разность осадок фундамента	0,002	0,002	0,003	СП 22.13330.2016, приложение Г, таблица Г.1
Коэффициент запаса устойчивости формы	9,480	8,940	> 2,000	СП 267.1325800.2016; п.8.2.4.17

Выводы. В ПК МОНОМАХ-САПР была сформирована пространственная модель 33-этажного монолитного здания высотой 125,10 м с двумя подземными этажами. Выполнен общий расчет (линейный и нелинейный) конструктивной системы с учетом совместной работы подземных и наземных конструкций, фундамента и основания в стадии эксплуатации на различные виды нагрузок (постоянное, длительное, кратковременное) и их сочетания. Проведен анализ результатов определения напряженно-деформированного состояния конструкций. Прочность и пространственная жесткость здания достигаются применением развитого в плане ядра, регулярным расположением колонн и жесткими узлами сопряжения между несущими конструкциями.

Рассмотренные методы расчета («инженерная нелинейность» и другие) позволяют оценить влияние снижения жесткостей материалов на изменение перемещений и перераспределение усилий при эксплуатационных нагрузках в практических расчетах. Перемещения увеличиваются во всех случаях, а экстремальные значения изгибающих моментов в плитах перекрытий снижаются по сравнению с результатами, полученными при линейном расчете. Однако разница результатов значительна и увеличивается с ростом высоты здания.

Снижение жесткостей железобетонных элементов с помощью коэффициентов по рекомендации нормативных документов менее точно отражают действительную работу строительных конструкций и направлены в основном на упрощение и ускорение расчетов. Такие расчеты следует проводить только для начального анализа напряженно-деформированного состояния конструкций и конструктивной системы в целом. Для получения достоверных результатов, экономичных и эффективных решений необходимо выполнять нелинейный расчет более точными методами. Проведенные исследования показывают, насколько важно на этапе проектирования правильно моделировать работу конструкций высотного монолитного здания с учетом изменения свойств материалов в эксплуатационный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Минстрой России, 2012. – 168 с.
2. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 102 с.
3. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2018. – 67 с.
4. Блохина Н. С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестник МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 384–387.
5. Блохина Н. С., Назаренко С. Н. Моделирование физически нелинейных и анизотропных свойств материала при расчете строительных конструкций в программном комплексе ANSYS // Инновации и инвестиции. – 2018. – №1. – С. 186–188.
6. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография. – Киев: Сталь, 2014. – 301 с.
7. Городецкий А. С., Барабаш М. С. Учет нелинейной работы железобетона в ПК ЛИРА-САПР. Метод «Инженерная нелинейность» // Международный журнал по

- расчету гражданских и строительных конструкций. – 2016. – № 2 (12). – С. 92–98.
8. Нелинейность в ЛИРА-САПР. Алгоритмы создания расчетных моделей с учетом нелинейной работы конструкций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.liraland.ru/984/3426/?sphrase_id=14578411 (дата обращения 15.01.2023).
 9. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: АСВ, 2009. – 344 с.
 10. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Расчет монолитных железобетонных плит перекрытий высотного жилого комплекса с учетом физической нелинейности [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2021. – № 6. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/raschet-monolitnyx-zhelezobetonnyx-plit-perekrytij-vysotnogo-zhilogo-kompleksa-s-uchetom-fizicheskoj-nelinejnosti> (дата обращения 25.01.2023).
 11. Городецкий Д. А., Юсипенко С. В., Батрак Л. Г., Лазарев А. А., Рассказов А. А. МОНОМАХ-САПР 2013. Примеры расчета и проектирования: учеб. пособие. – Киев: Электронное издание, 2013. – 368 с.
 12. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Стандартинформ, 2018. – 95 с.

АНТИПОВА Д. Р., АНТИПОВ А. С., УТКИНА В. Н.
ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ
МНОГОЭТАЖНОГО ЖИЛОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РОССИЙСКОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Аннотация. Выполнено формирование информационной модели многоэтажного жилого здания в BIM-системе Renga. Проведен экспорт модели и расчет конструктивной системы здания в ПК Лира 10.12. Представлены результаты моделирования и проектирования.

Ключевые слова: информационная модель здания, проектирование, многоэтажное жилое здание, российское программное обеспечение, BIM-система Renga, ПК Лира 10.12, результаты.

ANTIPOVA D. R., ANTIPOV A. S., UTKINA V. N.
INFORMATION MODELING AND DESIGN OF A MULTISTORY RESIDENTIAL
BUILDING USING RUSSIAN SOFTWARE

Abstract. The formation of an information model of a multistory residential building in the Renga BIM system was carried out. The model was exported and the structural system of the building was calculated in the Lira 10.12 PC. The results of modeling and design are presented.

Keywords: building information model, design, multistory residential building, Russian software, Renga BIM system, Lira 10.12 PC, results.

Цифровизация строительной отрасли является приоритетной для государства на современном этапе. По данным интернет источников число компаний, использующих BIM-технологии, значительно увеличилось в последние годы. Во многих отраслях строительства, таких как гражданское, промышленное, гидротехническое, проходит процесс трансформации, связанный с отказом от традиционных методов проектирования. На фоне этого возрастает острая необходимость создания в короткие сроки инновационных способов реализации проектов [1–3].

Одним из самых перспективных направлений, поддерживаемых государством на законодательном уровне, является информационное моделирование зданий и сооружений, которое имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами. Использование технологий информационного моделирования позволяет конкретно продумать эффективность архитектурных и конструктивных решений объектов, создать сложные строительные проекты с возможной корректировкой данных, в разы облегчить выпуск рабочей документации, существенно сократить количество ошибок и коллизий, а

также осуществить контроль над объектом на всех этапах его жизненного цикла. Важно грамотно научиться использовать огромные преимущества информационного моделирования при создании проектов.

Цель данной работы: формирование информационной модели и проектирование многоэтажного жилого здания с использованием российского программного обеспечения. Основные задачи исследования: создание информационной модели здания в BIM-системе Renga; экспорт модели в универсальный программный комплекс Лира 10.12; выполнение МКЭ расчёта конструктивной системы здания; анализ полученных результатов.

В настоящее время существует много программных комплексов для информационного моделирования зданий и сооружений: ArchiCAD, Renga, Revit, Allplan и другие. Приостановка работы в России ряда поставщиков иностранного программного обеспечения вносит свои коррективы в глобальные планы по цифровизации строительной отрасли. Необходим переход на BIM-системы российского производства. Ярким примером отечественного программного обеспечения является BIM-платформа Renga, которая позволяет создавать информационные модели зданий, различные инженерные конструкции и коммуникации, а также выводить чертежи и спецификации из полученной модели. Разработкой, развитием и продвижением системы занимается российское предприятие «Renga Software» [4].

Объектом проектирования является 16-этажный жилой дом с подвалом и техническим чердаком. Обеспечение архитектурных решений здания в значительной степени основывается на соответствующем конструировании, отвечающем как функциональным, так и художественно-эстетическим замыслам проектировщиков. Жилой дом имеет прямоугольную форму в плане с размерами $21,60 \times 22,35$ м. Высота здания – 50,92 м, высота типовых этажей – 2,80 м. Конструктивная система многоэтажного здания – монолитная ствольно-стенная, состоит из вертикальных и горизонтальных несущих элементов (фундамента, стен, плит перекрытий и покрытия). Фундамент свайный с плитным ростверком.

Материалы конструкций принимаются в соответствии с действующими сводами правил [5; 6]. Наружные стены подвала запроектированы из монолитного железобетона толщиной 300 мм. Материал наружных стен подвала и фундамента – бетон тяжелый класса B25 по прочности на сжатие, марок W6 по водонепроницаемости и F150 по морозостойкости. Внутренние стены подвала, стены надземной части, стены лифтовых шахт и лестничных клеток – толщиной 200 мм. Материал внутренних несущих стен – бетон класса B30 по прочности на сжатие, марки F75 по морозостойкости. Арматура во всех стенах стержневая горячекатаная периодического профиля класса A500C по ГОСТ Р 52544-2006,

гладкая А240 по ГОСТ 5781-82*. Плиты перекрытия запроектированы из монолитного железобетона толщиной 160 мм, плита покрытия над техническим этажом и плита перекрытия машинного помещения – толщиной 200 мм. Материал плит – бетон класса В25 по прочности на сжатие, марка по морозостойкости – F100; арматура стержневая горячекатаная периодического профиля класса А500С по ГОСТ Р 52544-2006.

Создание модели здания средствами, реализующими технологию информационного моделирования, рекомендуется выполнять в трехмерном пространстве. Проектирование модели в Renga начинается с построения осей и типового этажа на рабочем уровне [7].

Несущие конструкции здания моделируются с помощью соответствующих инструментов. Задаем основные параметры стен (материал, толщину, высоту), вызвав инструмент «Стена». Строим стены этажа необходимой толщины и с учетом параметров привязки к координационным осям, а затем – окна и двери. Для создания лестницы и ее ограждения можно воспользоваться инструментами «Лестница» и «Ограждение». Настроив все параметры, выполняем построение конструкций в соответствии с заданием. Создание перекрытия и проема в нем производим с помощью инструментов «Перекрытие» и «Проем».

На рисунке 1 представлена пространственная модель типового этажа здания.

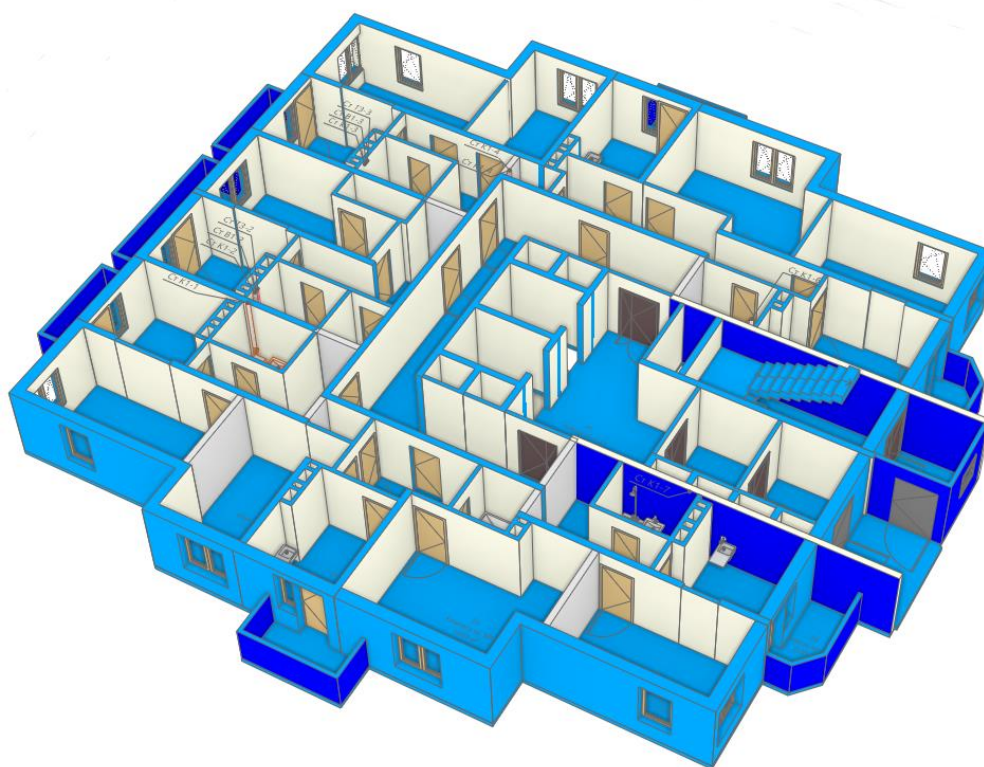


Рис. 1. 3D-модель типового этажа.

Для того чтобы создать 2 – 16 этажи, удобно использовать копирование типового этажа. Правильность выполненных действий легко проверить в 3D-виде.

Полученная в системе Renga информационная архитектурная модель проектируемого здания представлена на рисунке 2. Планы, фасады, разрезы и другие виды создаются из нее автоматически. Следует отметить высокую скорость создания 3D-модели и наполнения ее информацией.

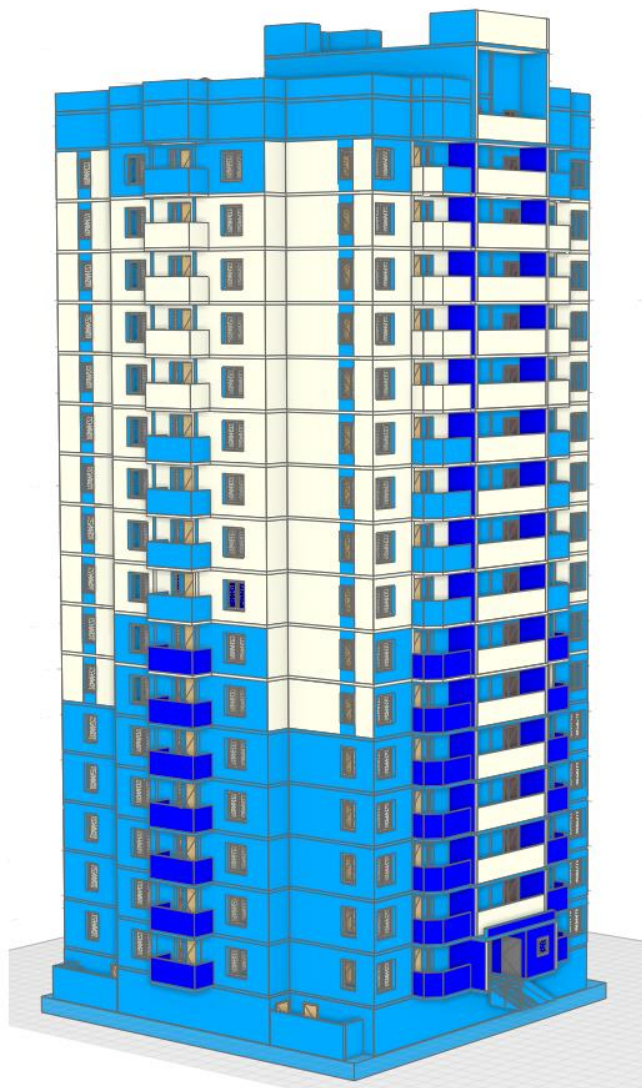


Рис. 2. Информационная модель проектируемого здания в системе Renga.

Расчет строительных конструкций и сооружений можно выполнить с помощью многофункциональных программных комплексов, базирующихся на методах строительной механики. Получить точное аналитическое решение уравнений механики, отражающих напряженно-деформированное состояние многочисленных элементов конструкции, практически не реально. Поэтому подобные системы уравнений решаются приближенно с помощью численных методов. С этой целью в ПК ЛИРА 10.12 используется метод конечных элементов (МКЭ) в перемещениях. Программный комплекс ЛИРА 10.12 является современным инструментом технологии информационного моделирования и позволяет

осуществлять интеграцию с передовыми BIM-платформами: Autodesk Revit, Tekla, Model Studio CS, Renga и другими [8].

В версии ПК ЛИРА 10.12 появился плагин для передачи BIM-модели из системы Renga. Создана информативная форма процесса экспорта для основных структурных типов элементов. При этом выводится журнал сопоставления материалов и сечений конструкций, при необходимости их можно изменить [9]. В ПК Лира 10.12 открывается аналитическая модель здания. Каждому конструктивному элементу из графического комплекса соответствует архитектурный элемент, если это колонна или балка – стержень; для стены, фундаментной плиты и перекрытия – пластина. Архитектурный элемент обладает необходимыми жесткостными характеристиками для расчета, такими как сечение и материал. На рис. 3 представлена аналитическая модель здания, которая получена после экспорта из системы Renga в ПК Лира 10.12.

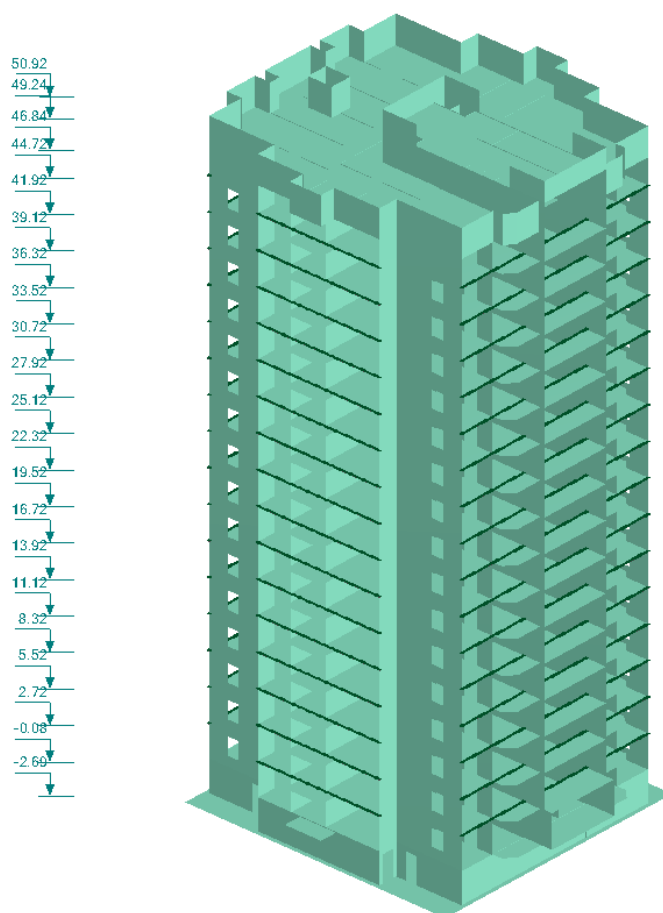


Рис. 3. Аналитическая модель конструктивной системы здания в ПК Лира 10.12.

Автоматическая триангуляция модели на конечные элементы выполняется с учетом заданных параметров (метода и шага). Стены и плиты перекрытий разбиваются на универсальные конечные элементы оболочки КЭ 42, КЭ 44, балки представлены стержневым элементом КЭ 10. Расчетная схема здания состоит из 496924 конечных элементов и 470679

узлов (рис. 4).

Выполняется моделирование различных видов нагрузок: постоянной, длительной и кратковременной. Состав и величины учтенных в расчетной модели нагрузок и воздействий, а также коэффициенты надежности по нагрузке γ_f и назначению γ_n принимаются по СП 20.13330.2016 [10] и техническому заданию. Сформировано 15 загрузений, которые включают собственный вес несущих конструкций, постоянные нагрузки от пола и кровли, перегородок и наружных ненесущих стен, временные нагрузки на перекрытии и покрытии, снеговую и ветровую нагрузки. Созданы основные расчетные сочетания нагрузок и усилий.

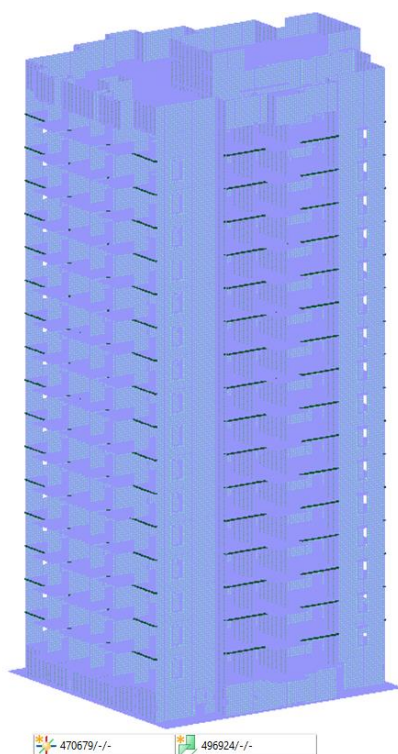


Рис. 4. Конечно-элементная схема конструктивной системы здания.

Для учета взаимодействия работы сооружения с грунтом основания задаются геологические условия площадки строительства, по которым выполняется автоматическое построение модели грунта под проектируемым зданием с последующим вычислением коэффициентов постели или жесткости элементов, моделирующих работу свай с помощью нового конечного элемента 57 – «Свая». Появление этого конечного элемента значительно расширяет возможности программного комплекса при расчете зданий на свайных фундаментах. Реализованы положения СП 22.13330.2016 и СП 24.13330.2011 [11; 12]. Геологические условия, а также физико-механические характеристики грунтов основания задаются в «Редакторе грунта» [8].

Заполняем таблицу с характеристиками грунта, в которую вносим основные

параметры для каждого ИГЭ (инженерно-геологического элемента). Расставляем сваи и скважины согласно схеме их расположения на площадке строительства, задаем параметры для расчета условного фундамента и определяем осадки основания, коэффициенты постели, глубину сжимаемой толщи, усредненный модуль деформации, несущую способность свай.

Основным этапом решения задачи методом конечных элементов является формирование и решение системы канонических уравнений относительно неизвестных узловых перемещений. Жесткости сечений конструкций и их соединений вычисляются программой в соответствии с их геометрическими параметрами и физическими характеристиками материалов, с учетом условий работы конструкций, вводимых в расчетную модель.

Выполняем статический расчет пространственной модели здания с учетом совместной работы несущих конструкций, фундамента и основания. После успешного расчета переходим в режим «Результаты расчета». На рис. 5 – 8 представлены некоторые результаты определения перемещений в узлах и усилий в элементах конструкций, проверки устойчивости системы.

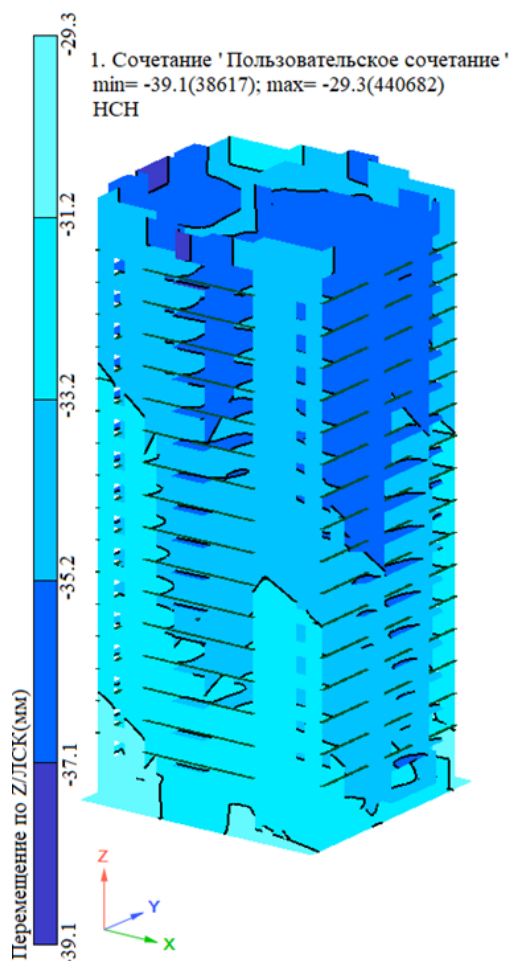


Рис. 5. Перемещения по оси Z, мм.

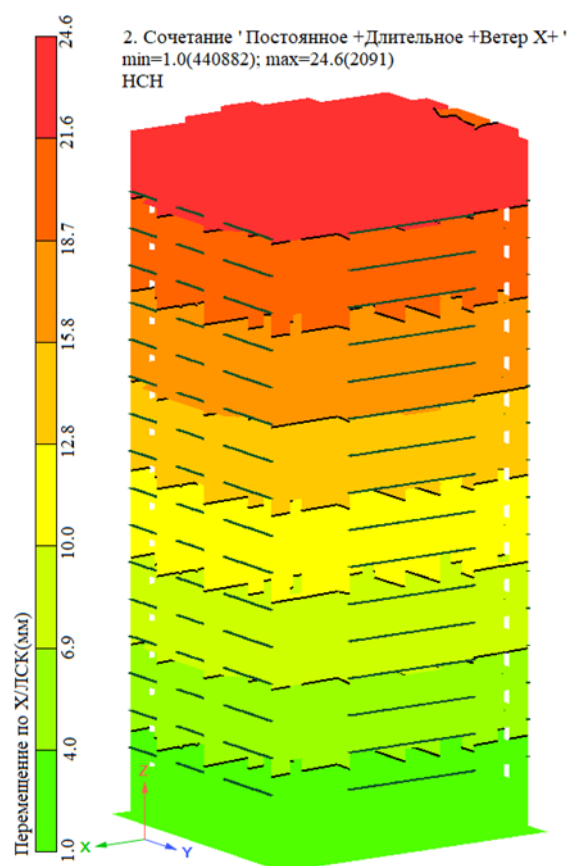


Рис. 6. Перемещения по оси X, мм.

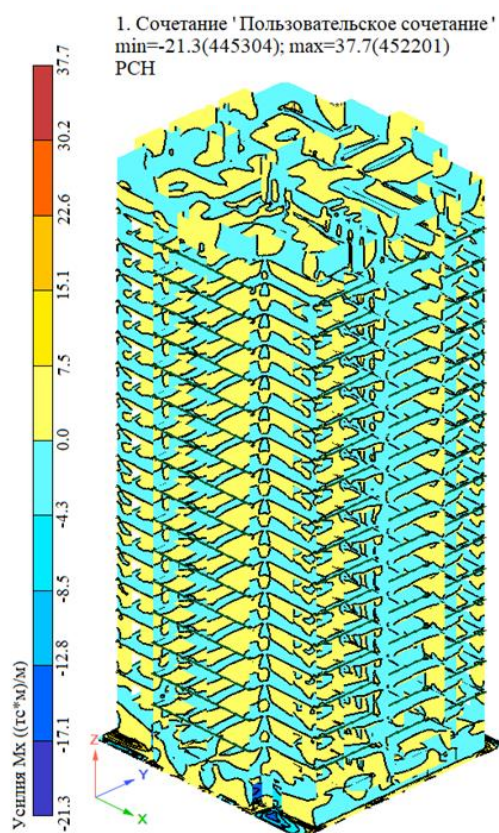


Рис. 7. Усилия M_x от РСН1, тсм/м.

1..1. Форма потери устойчивости 1
Коэффициент запаса: 32.1

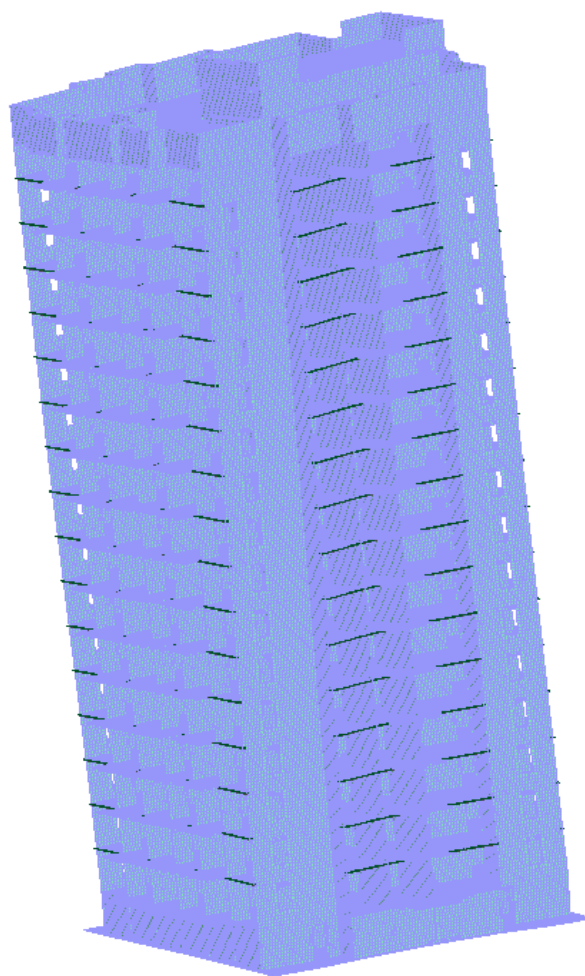


Рис. 8. Первая форма потери устойчивости от РСН1.

Неравномерность перемещений по оси Z и наибольшие их значения на 16-ом этаже можно объяснить изменением осадки опор плит и различным укорочением вертикальных элементов в общей схеме здания. Горизонтальные перемещения системы зависят от направления и значения ветровой нагрузки и с повышением ветрового давления увеличиваются по высоте здания. Наблюдается характерная картина изменения изгибающих моментов в монолитных плитах перекрытий: на опорах моменты имеют отрицательный знак, в пролетах – положительный.

Определены основные эксплуатационные параметры монолитной конструктивной системы здания: горизонтальные перемещения верха, перекосы этажных ячеек, прогибы плит перекрытий, коэффициенты запаса устойчивости, максимальная осадка фундамента, относительная разность осадок и другие.

В таблице представлены результаты сравнения основных расчетных эксплуатационных параметров конструктивной системы здания с допустимыми значениями.

Полученные значения основных параметров не превышают допустимых значений, установленных нормативными документами.

Таблица

**Сравнение основных эксплуатационных параметров
конструктивной системы здания с допустимыми значениями**

Наименование параметра	Полученное значение	Предельно допустимое значение	Наименование источника
Горизонтальное перемещение верха конструкции по X, см	2,45	5,10	СП 430.1325800; п.6.2.9
Горизонтальное перемещение верха конструкции по Y, см	0,32	5,10	
Перекося этажных ячеек, см	0,30	0,93	СП 20.13330.2016; приложение Д, таблица Д.4
Прогиб плиты перекрытия 1-го этажа, см	0,25	3,33	СП 20.13330.2016, приложение Д, таблица Д.1
Прогиб плиты перекрытия 5-го этажа, см	0,25	4,13	
Средняя осадка фундамента, см	3,59	15	СП 22.13330.2016, приложение Г, таблица Г.1
Относительная разность осадок фундамента	0,0007	0,003	
Коэффициент запаса устойчивости формы	32,10	> 2	СП 430.1325800; п.6.2.11

Выводы. В настоящее время, в связи со сложившейся ситуацией в стране, необходим переход на отечественное программное обеспечение. BIM-платформа Renga и ПК Ли́ра 10.12 представлены в Едином реестре российских программ, успешно используются для моделирования, расчета и проектирования многоэтажных и высотных зданий, имеют доступную стоимость лицензионных профессиональных версий и не подвержены рискам санкций.

В данной статье были продемонстрированы основные этапы создания информационной модели многоэтажного жилого дома из монолитного железобетона с применением BIM-системы Renga и универсального расчетного программного комплекса Ли́ра 10.12. Пространственная модель здания из системы Renga экспортировалась в ПК Ли́ра 10.12. По данным инженерно-геологических исследований на площадке строительства разработана модель грунта. Проведен общий расчет конструктивной системы здания методом конечных элементов на эксплуатационные нагрузки и определены перемещения, усилия и напряжения. Прочность, пространственная жесткость и устойчивость многоэтажного здания и его отдельных конструкций в стадии эксплуатации обеспечены. Реализация передачи информационной модели в ПК Ли́ра 10.12 без потери данных значительно ускорила процесс проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уровень применения BIM в России 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://concurator.ru/information/bim_report_2019 (дата обращения 12.01.2023).
2. Якубов С. А. BIM технологии в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.cnews.ru/articles/2020-02-21_bim_v_rossiichto_ego_stimuliruet (дата обращения: 12.01.2023).
3. Манин П. А. Искусственный интеллект (AI) для решения задач строительной индустрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://youtu.be/C7dBPvcebqE> (дата обращения 12.01.2023).
4. Renga – российская BIM-система для проектирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rengabim.com/> (дата обращения 12.01.2023).
5. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 150 с.
6. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2019. – 67 с.
7. Проектирование зданий и сооружений в Renga Architecture [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://upport.ascon.ru/source/info_materials/Renga%20Architecrure_posobie.pdf (дата обращения 12.01.2023).
8. Программный комплекс Лира 10.12: руководство пользователя / Ю. Д. Гераймович, И. Д. Евзеров, В. В. Киричок, А. В. Колесников и др. – М., 2021. – 857 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lira-soft.com/> (дата обращения 12.01.2023).
9. Совместная работа Renga – Лира 10 – Видеокурс: видеоматериал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=QbwKqx7ZZYs> (дата обращения 12.01.2023).
10. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, 2). – М.: Стандартинформ, 2017. – 95 с.
11. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2017. – 162 с.
12. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – М.: Стандартинформ, 2012. – 86 с.

КУПРИЯШКИНА Л. И., ОСИНА П. Н., ПИКСИНА Е. В., ЕРМОЛАЕВ Д. Н.
ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ
В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

Аннотация. В статье дан анализ применения вакуумных теплоизоляционных панелей (ВИП-панелей), разработанных на базе местного сырья. Приведен расчет сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций жилого здания. Показаны конструкции многоэтажного жилого здания с учетом эффективной толщины вакуумной теплоизоляции.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, ограждающие конструкции, вакуумная теплоизоляционная панель, наполнитель, теплопередача, утеплитель, толщина слоя, изоляция.

KUPRIYASHKINA L. I., OSINA P. N., PIXINA E. V., ERMOLAYEV D. N.
ECONOMIC JUSTIFICATION OF EXPEDIENCY
APPLICATIONS OF VACUUM THERMAL INSULATION
IN ENCLOSING STRUCTURES OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Abstract. The article analyzes the use of vacuum thermal insulation panels (VIP-panels) developed on the basis of local raw materials. The calculation of the heat transfer resistance of the enclosing structures of a residential building is given. The designs of a multistory residential building are shown taking into account the effective thickness of vacuum insulation.

Keywords: coefficient of thermal conductivity, enclosing structures, vacuum thermal insulation panel, filler, heat transfer, insulation, layer thickness, insulation.

В условиях преодоления экономикой страны кризисных явлений российские предприятия стремятся не потерять ожидаемую прибыль и рассчитывают, по возможности, её увеличить. На увеличение прибыли влияет как рост доходов, так и сокращение расходов. Снизить стоимость строительства можно, в том числе, и за счет применения современных материалов. Наиболее оптимальным решением, с точки зрения затрат, является утепление стен, что позволяет снизить стоимость и сделать дом более комфортным для проживания. Наиболее эффективным и перспективным теплоизоляционным материалом в настоящее время является вакуумная теплоизоляция. Согласно расчетам для жилого многоэтажного дома, фасад которого представлен на рисунке 1, требуется 1077 м³ кирпичной кладки и 2100 м² утеплителя. В качестве наполнителя в разработанных ВИП-панелях вместо микрокремнезема марки Конасил-200 использовался микрокремнезем, полученный из диатомита Атемарского месторождения Республики Мордовия, а также 10% диоксида титана,

12,5% минерального волокна, что существенно уменьшило себестоимость панели (оболочка – 12 мкм PETmet), составившей 473,4 руб./м².



Рис. 1. Фасад жилого многоэтажного дома.

Для сравнения был проведен расчет нескольких вариантов себестоимости ограждающих конструкций рассматриваемого жилого здания (рис. 2). Согласно сравнительному анализу, применение вакуумной панели в качестве теплоизоляционного слоя может способствовать снижению себестоимости ограждающих конструкций на 2 529 660 руб. относительно конструкции с утеплителем Rockwool Фасад Баттс, и на 11 736 000 руб. относительно конструкции из поризованного кирпича при обеспечении одинакового сопротивления теплопередачи.

С учетом полученного коэффициента теплопроводности предлагаемых ВИП-панелей был проведен теплотехнический расчет ограждающих конструкций жилого дома (рис. 3 – 5) с использованием в качестве теплоизоляционного материала разработанных вакуумных панелей разной толщины. Требуемое сопротивление теплопередаче для наружных стен должно быть (согласно требований СП 50.13330.2012) не менее 3,30 (м²·°C)/Вт, для конструкций перекрытий над неотапливаемым подвалом – не менее 3,90 (м²·°C)/Вт, для утепления кровли – не менее 4,90 (м²·°C)/Вт. Результаты расчетов сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций жилого дома с использованием вакуумного теплоизоляционного материала толщиной 20 и 30 мм для наружных стен, толщиной 30 и 40

мм для перекрытий над неотапливаемым подвалом и кровельного покрытия такой же толщины приведены в таблице 1, где R_0^{Tr} – требуемое сопротивление теплопередаче, R_f – фактическое сопротивление теплопередаче.

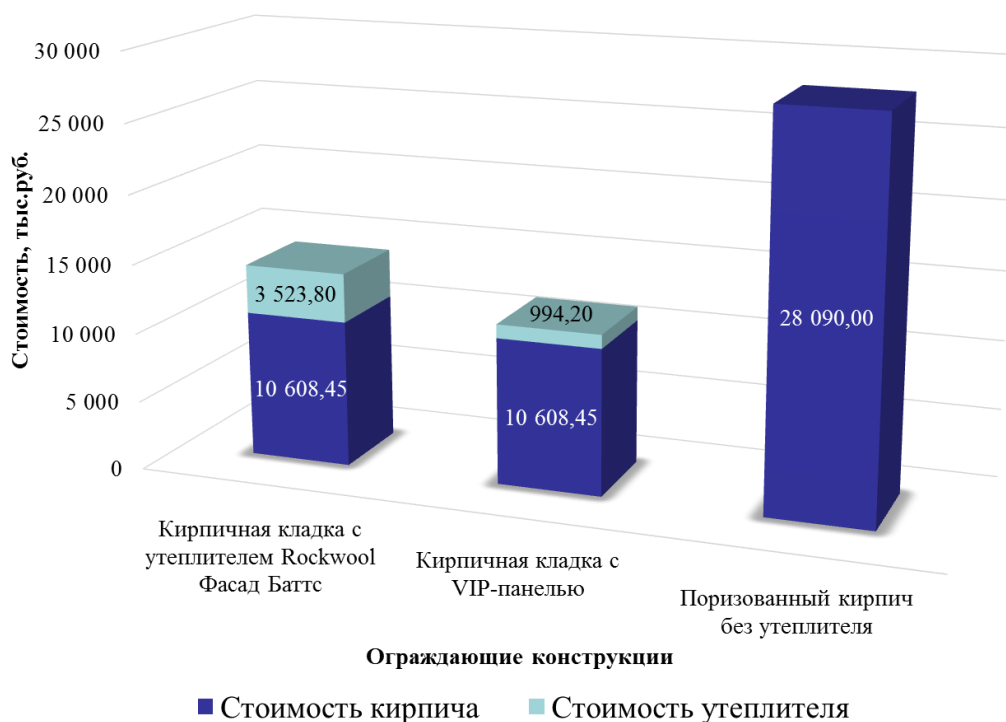


Рис. 2. Экономическое обоснование целесообразности применения вакуумной теплоизоляции в ограждающих конструкциях.

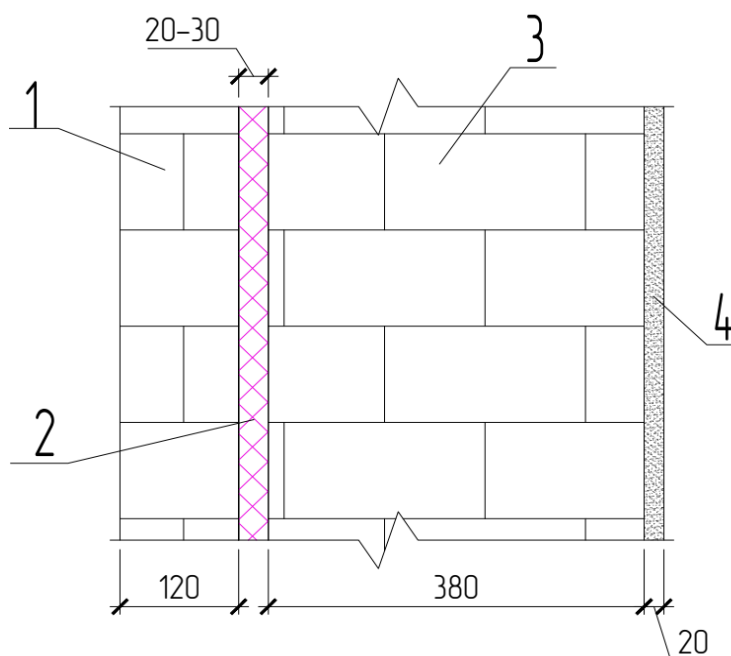


Рис. 3. Конструкции стен из кирпичной кладки с вакуумным утеплителем:
 1 – облицовка из кирпича 120 мм, 2 – вакуумная панель 20 – 30 мм,
 3 – кладка кирпичная 380 мм, 4 – известково-песчаная штукатурка 20 мм.

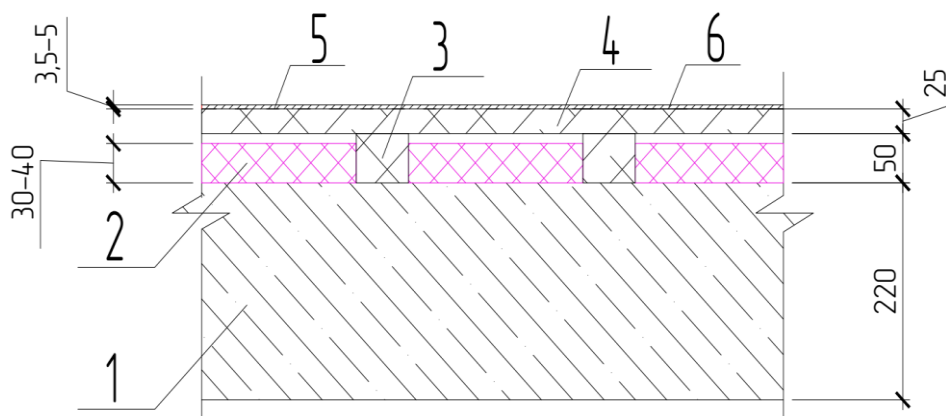


Рис. 4. Конструкция перекрытия над неотапливаемым подвалом с применением вакуумных панелей: 1 – плита перекрытия 220 мм; 2 – вакуумная панель 30 – 40 мм; 3 – лаги; 4 – фанера/дощатые полы 25 мм; 5 – подложка вспененная 1 слой; 6 – пол (щиты паркетные) 3,5-5 мм.

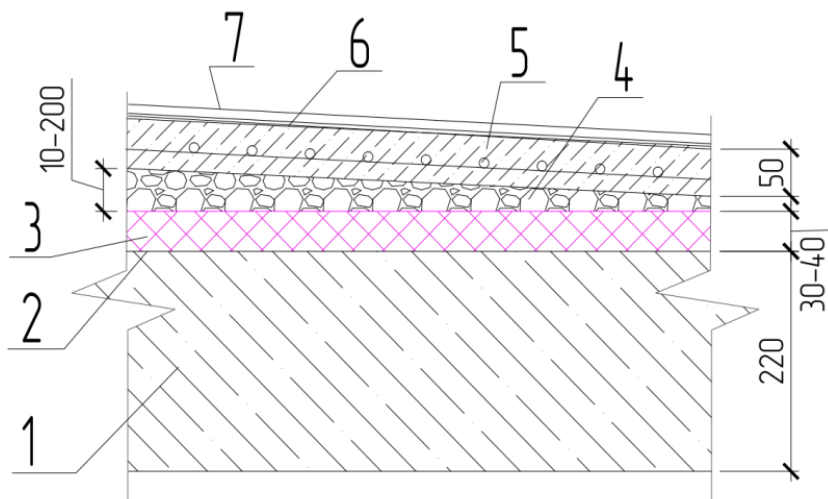


Рис. 5. Конструкция покрытия с использованием вакуумного утеплителя: 1 – железобетонная плита покрытия 220мм, 2 – унифлекс ТПП, 1 слой, 3 – вакуумная панель 30 мм, 4 – керамзитобетонный гравий 10 – 200 мм, 5 – армированная ц/п стяжка – 50 мм, 6 – праймер битумный, 7 – техноэласт.

Таблица 1

Сопротивление теплопередачи конструкций

Ограждающие конструкции	Сопротивления теплопередаче с учетом толщины утеплителя ($\sigma_{\text{ут}}$), ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)/Вт	
	при $\sigma_{\text{ут}} = 20$ мм $R_{\text{ф}} = 3,33 > R_0^{\text{Тр}} = 3,30$	при $\sigma_{\text{ут}} = 30$ мм $R_{\text{ф}} = 4,55 > R_0^{\text{Тр}} = 3,30$
Перекрытия над неотапливаемым подвалом	при $\sigma_{\text{ут}} = 30$ мм $R_{\text{ф}} = 4,02 > R_0^{\text{Тр}} = 3,90$	при $\sigma_{\text{ут}} = 40$ мм $R_{\text{ф}} = 5,24 > R_0^{\text{Тр}} = 3,90$
Кровельное покрытие	при $\sigma_{\text{ут}} = 30$ мм $R_{\text{ф}} = 6,00 > R_0^{\text{Тр}} = 4,90$	при $\sigma_{\text{ут}} = 40$ мм $R_{\text{ф}} = 7,22 > R_0^{\text{Тр}} = 4,90$

Расчеты и анализ применения ВИП-панелей, разработанных на базе местного сырья, позволяет сделать следующие выводы:

- для получения качественных вакуумных теплоизоляционных панелей, которые можно использовать в качестве теплоизоляционного материала в ограждающих конструкциях жилых зданий, широко используемый наполнитель микрокремнезем марки Конасил-200, можно заменить на не менее эффективный диоксид кремния, полученный из диатомита Атемарского месторождения республики Мордовия [1];
- использование вакуумной изоляции позволит увеличить полезную площадь помещения жилого здания за счет снижения толщины утеплителя;
- для уменьшения коэффициента теплопроводности в состав наполнителя вакуумной панели можно ввести до 10% диоксида титана и 12,5% минерального волокна и использовать оболочку – 12 мкм PETmet [2];
- оптимальная толщина ВИП-панелей для применения в ограждающих конструкциях из кирпичной кладке – 30 мм, для утепления перекрытия – 40 мм, для утепления кровли – 40 мм.
- коэффициент теплопроводности вакуумных панелей стабилен, изменяется во время эксплуатации не значительно;
- применение в качестве утеплителя ВИП-панелей экономически выгодно при строительстве жилых зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2740995 Российская Федерация, МПК С 01 В 33/18 Способ получения микрокремнезема из природного диатомита осаждением раствора азотной кислоты / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, А. А. Седова, Д. Л. Карандашов, М. А. Муханов; заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарёва. № 2020116983; заявл. 22.05.2020; опубл. 22.01.2021, Бюл. № 3. – 7 с.
2. Долгов И. П., Киселев Н. Н., Куприяшкина Л. И., Нурлыбаев Р. Е., Селяев В. П. Разработка вакуумных панелей на основе микрокремнезема из наноструктурированного порошка частиц диатомита [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2018. – № 9. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/razrabotka-vakuumnyx-panelej-na-osnove-mikrokremnezema-iz-nanostrukturirovannogo-poroshka-chastic-diatomita> (дата обращения 10.03.2023).

ЗОТОВА К. А., МЕЛЬНИКОВА Н. С., ЛАНКИНА Ю. А.
ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
ИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РОССИИ

Аннотация. В статье рассматриваются основные принципы и проблематика внедрения технологий информационного моделирования в России, а также возможности и перспективы применения информационных технологий в промышленном и гражданском строительстве. Представлен обзор реального опыта реализации технологии BIM-проектирования.

Ключевые слова: BIM-технология, BIM-моделирование, информационная модель, проектирование, ТИМ, стандарты, строительство, Россия.

ZOTOVA K. A., MELNIKOVA N. S., LANKINA YU. A.
PROBLEMS OF INTRODUCING INFORMATION
MODELING METHODS IN RUSSIA

Abstract. The article discusses the basic principles and problems of introducing information modeling technologies in Russia along with the possibilities and prospects for the use of information technologies in industrial and civil construction. An overview of real experience in implementing BIM design technology is provided.

Keywords: BIM-technology, BIM-modeling, information model, BIM, standards, construction, Russia.

В Российской Федерации впервые проекты с применением BIM-технологий появились более 10 лет назад, а термин «Информационная модель объекта капитального строительства» в Градостроительном кодексе закрепили только в 2019 году. Это событие можно считать стартом широкого распространения BIM-технологий в России. При этом необходимо признать, что Россия отстает от западных стран в плане использования технологии информационного моделирования – на западе соответствующее программное обеспечение (ПО) внедряли уже в 80-х годах прошлого века [1; 2].

План внедрения BIM-технологий в сферу промышленного и гражданского строительства был утверждён Минстроем Российской Федерации в декабре 2014 года. Разработкой документа занимались совместно Росстандарт, Экспертный совет при правительстве Российской Федерации и иные институты по модернизации экономики и инновационному развитию.

В марте 2015 года Минстрой РФ сообщил, что в целях реализации плана поэтапного внедрения BIM-технологий в сфере промышленного и гражданского строительства

определены критерии отбора пилотных проектов с использованием информационных технологий моделирования зданий.

Критерии включают [3]:

- опыт организации в части выполнения проектов с использованием BIM-технологий;
- наличие в штате специалистов по работе с BIM-технологиями;
- разработанные организацией документы, регламентирующие порядок проведения этапов информационного моделирования;
- использование специалистами организации при реализации проекта единой информационной модели основных разделов проекта (архитектура, конструктивные решения, сметы и др.);
- наличие у организации управляемой 3D-среды с вложенными данным и средствами согласованного объединения данных.

Следующим шагом внедрения был отбор пилотных проектов, соответствующих этим критериям и последующее прохождение государственной экспертизы. В дальнейшем, исходя из опыта создания пилотных проектов, должен быть разработан перечень нормативно-правовых и нормативно-технических актов, образовательных стандартов, подлежащих корректировке или разработке.

2017 год можно считать началом внедрения BIM-технологий. В октябре 2017 утвержден план внедрения BIM-технологии в деятельность Московского Строительного Комплекса. Этот план предусматривал подготовку к использованию BIM-технологий Строительным комплексом Москвы к 2019 году, дополненную мерами по ее продвижению в положениях Минстроя России, утвержденных для оптимизации внедрения BIM-технологий на федеральном уровне. Документ предусматривал срок выполнения работ до декабря 2018 года. В ходе реализации данного материала необходимо было создать нормативную базу по применению BIM-технологий на основных этапах строительства объектов гражданского назначения, оценить преимущества BIM на «пилотных проектах», а также проводить повышение квалификации специалистов и обучение работе с сопутствующим программным обеспечением.

Завершить работу над общероссийским классификатором строительной информации планировалось к 2020 году, а начать перевод нормативно-технической документации в машиночитаемый формат к 2021 году. Во II квартале 2020 года информацию о информационных моделях, создаваемых в результате применения BIM-технологий, планировалось отнести к категории технологических данных и нормативно закрепить хранение этих данных только на территории Российской Федерации. До конца 2022 года

планировалось всё строительство промышленных и гражданских зданий госструктурами осуществлять с применением BIM-технологий [3].

В настоящее время внедрение технологий информационного моделирования достаточно успешно внедряется в строительную сферу, но это сопряжено с определёнными трудностями. В первую очередь трудности вызваны дополнительными финансовыми издержками, связанными с переходом на BIM-технологии. Кроме того, определенные сложности создает незрелость BIM-инструментов. В данный момент от BIM-технологий требуется больше, чем они могут предоставить. В частности, область строительного контроля «не закрыта» и программное обеспечение только разрабатывается.

Одной из существенных проблем является то, что в настоящее время отсутствует производитель программного обеспечения, который обеспечивал бы все запросы и потребности российских компаний. У каждого производителя ПО есть сильные и слабые стороны, поэтому приходится сочетать программные продукты от разных производителей.

Стоит отметить, что процесс внедрения BIM-технологий отличается в зависимости от области строительства. Проблемы у этих областей различны, как и пути их решения:

- к примеру, в линейном строительстве это большая протяженность объектов (при строительстве зданий проще провести изыскания, нежели для десятков километров дороги) – такие геометрические параметры требуют значительного объема изысканий, которые порой не проводятся в должной мере;
- промышленные объекты строятся в зависимости от технологического назначения, а у каждой технологии своя специфика. Обычно такие проекты содержат большое количество участников, что проблемно учитывать при внедрении BIM-технологий;
- в гражданском строительстве важна скорость обмена информацией и цикличность взаимодействия между участниками проектной группы.

Отдельного упоминания заслуживает несовершенство законодательства в области информационного моделирования. BIM-технологии подразумевают использование информационной модели как единственного источника данных, в то время как определенные надзорные органы требуют значительную часть информации дублировать на бумагу или другие электронные документы, не связанные с информационной моделью. В такие моменты появляется вероятность того, что часть информации либо будет вноситься с опозданием, либо вообще потеряется. Несовершенство общей стандартизации, закреплённой на государственном уровне, также является серьезным препятствием перед распространением BIM-технологий в России [3 – 6].

В настоящее время в Российском законодательстве все чаще стараются использовать аббревиатуру ТИМ (Технологии Информационного Моделирования) вместо иностранной

BIM (Building Information Modeling). 19 января 2021 вышел приказ №787 Минтруда России с утвержденным профессиональным стандартом BIM-специалистов. За основу были взяты русские словосочетания с приставкой ТИМ, то есть ТИМ-техник, ТИМ-мастер, ТИМ-проектировщик и другие. С 1 января 2022 года, согласно постановлению правительства Российской Федерации, подписанного Премьер-министром М. Мишустиним, строительная отрасль при подготовке проектной документации с привлечением бюджетных средств была обязана перейти на технологию информационного моделирования.

В марте 2022 года один из наиболее востребованных разработчиков BIM-комплексов Autodesk обнародовал сообщение о временной приостановке лицензий в России. Для многих фирм новость стала ударом, поскольку почти весь рабочий процесс был заточен именно под его ПО. В сложившейся ситуации существенно ускорилось внедрение в процесс проектирования отечественных программных комплексов. При этом отмечаются некоторые минусы российских программ по сравнению с зарубежными, одним из которых является невозможность работы в одной среде всем специалистам. Кроме того, на данном этапе развития российские компании имеют небольшой опыт в выполнении технически и геометрически сложных проектов [3].

Однако у отечественного софта есть и некоторые преимущества, например, по оформлению документации; при этом используются российские нормы, создаются каталоги элементов в соответствии с ГОСТами.

В настоящее время Россия взяла курс на повсеместное применение ТИМ в строительной отрасли. Однако основной опыт создания цифровых моделей в Российской Федерации это, как правило, объекты крупных компаний и холдингов. При этом отрасль зависит от иностранного программного обеспечения, что делает ее уязвимой и зависимой от поставщиков данного ПО. На данный момент отечественные разработчики активно работают над созданием программных продуктов и серверов, которые позволяли бы работать и взаимодействовать как с иностранными программными продуктами, так и с отечественным софтом.

В настоящее время в Республике Мордовия также проходит процесс серьезной трансформации, связанный с отказом от традиционных методов проектирования и изысканий с передачей документации в бумажном виде в пользу инновационных способов реализации проектов. Одной из проектных организаций Республики Мордовия, которая с 2016 года активно внедряет BIM-технологии в процесс инженерных изысканий и проектирования линейных и площадных объектов является ООО «Региональный НИИ центр». Первый проект, выполненный данной организацией и полностью созданный на основе BIM-технологий, успешно прошел государственную экспертизу и получил положительное заключение ГАУ

«Управление государственной экспертизы Республики Мордовия» в начале 2022 года. Данным проектом является проектная документация по объекту: «Строительство автомобильной дороги в 4 микрорайоне комплексной застройки многоэтажными жилыми домами на участке между ул. Волгоградская и автомобильной дорогой на с. Кочкурово (в районе р. Тавла), г. Саранск (2 этап)», строительство которой идет в настоящий момент. Применение BIM-технологий при проектировании объекта не ограничивалось формированием только цифровой проектной документации, но включало также создание цифровой модели местности, в которую интегрированы данные по инженерно-геодезическим, инженерно-геологическим и инженерно-экологическим изысканиям.

За прошедший год с применением BIM-технологии специалистами ООО «Региональный НИИ центр» были выполнены и прошли государственную экспертизу 5 объектов капитального строительства. С уверенностью можно сказать о том, что процесс пошел. Успешное прохождение государственной экспертизы проектами, предусматривающим внедрение BIM-технологий, реализованные ООО «Региональный НИИ центр», станет хорошим толчком для повсеместного внедрения технологий информационного моделирования в строительной отрасли Мордовии.

Необходимо отметить, что для полноценного перехода всех участников строительной отрасли Российской Федерации на технологии информационного моделирования необходимо предпринять следующие действия:

- завершить формирование классификатора конструктивной информации и запуск подсистем его обслуживания;
- задать требования к программному обеспечению с поддержкой ввода/вывода в открытые форматы (IFC, xml и т.д.);
- отечественным производителям программного обеспечения необходимо довести свои продукты до конкурентного уровня;
- завершить разработку нормативных и технологических основ для внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства с использованием технологий информационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов В. В. Основы BIM: Введение в информационное моделирование зданий. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 392 с.
2. BIM-технологии (рынок России) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения 22.02.2023).

3. Российские BIM-специалисты раскрыли перспективы строительного рынка после ухода зарубежного ПО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cheltoday.ru/articles/ekonomika/rossiyskie-bim-spetsialisty-raskryli-perspektivy-stroitel'nogo-rynka-posle-ukhoda-zarubezhnogo-po> (дата обращения 22.02.2023).
4. Ланкина Ю. А., Митрошин И. А., Акишина О. А. Информационные технологии в промышленном и гражданском строительстве // Информационные технологии в архитектуре и строительстве: материалы II Всероссийского научно-практического семинара. – Саранск, 2017. – С. 73–77.
5. Зотова К. А., Ланкина Ю. А., Мельникова Н. С. Внедрение методов информационного моделирования в зарубежных странах [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2022. – № 3. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/vnedrenie-metodov-informacionnogo-modelirovaniya-v-zarubezhnyx-stranax> (дата обращения 22.02.2023).
6. Ланкина Ю.А., Митрошин И.А., Акишина О.А. Оценка эффективности внедрения информационного моделирования в процесс проектирования и строительства // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – С. 86–90.

БЕРЕЗЕНЦЕВА А. А., НИЗИНА Т. А., ОШКИНА Л. М.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ НАЧАЛА КООРДИНАТ В ПК REVIT
С ПОМОЩЬЮ ЯЗЫКА ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ DYNAMO

Аннотация. Выполнено описание некоторых возможностей среды визуального программирования Dynamo при определении точки начала координат в файле Revit. Представлены методы работы скриптов DYNAMO.

Ключевые слова: информационное моделирование, среда визуального программирования, Autodesk Revit, DYNAMO, скрипты, нод.

BEREZENTSEVA A. A., NIZINA T. A., OSHKINA L. M.
DETERMINATION OF THE ORIGIN POINT IN THE REVIT FILE USING
THE DYNAMO VISUAL PROGRAMMING LANGUAGE

Abstract. Some features of the Dynamo visual programming environment are described when determining the origin point in the Revit file. Methods of operation of DYNAMO scripts are presented.

Keywords: information modeling, visual programming environment, Autodesk Revit, DYNAMO, scripts, node.

В последние годы в связи с активным внедрением информационных технологий в строительную отрасль появляется все больше дополнительных инструментов, позволяющих существенно ускорить работу с информационными моделями [1–5]. Одним из таких продуктов является DYNAMO – инструмент для визуального программирования с открытым кодом. DYNAMO представляет собой встроенный плагин для Revit и некоторых других программных продуктов компании Autodesk. Устанавливается как часть программного обеспечения Autodesk Revit вместе с программными узлами, специфичными для Revit. Данный плагин помогает значительно снизить затраты времени при моделировании и подготовке выходной документации цифровой информационной модели объекта капитального строительства [6–8], а также избежать ошибок и неточностей при экспорте и импорте в другие файлы с собственной системой координат. В данной статье рассмотрена работа некоторых возможностей DYNAMO на примере написания скрипта для определения точки начала координат в файле Revit.

При реальном проектировании достаточно часто возникает потребность в расположении на строительной площадке нескольких корпусов или блоков здания на разных высотах и под разным углом относительно друг друга. В Autodesk Revit подобные объекты проектируются в отдельных файлах (пользовательский файл) для каждого блока или же

корпуса и впоследствии объединяются в общем файле проекта (эталонный файл) на необходимых высотах. Каждый файл имеет свою систему координат.

В Revit предусмотрены две системы координат:

- внутренняя система для проекта (определяется базовой точкой проекта);
- общая система (определяется точкой съемки).

При моделировании блока ему присваивается система координат относительно базовой точки проекта, от нее ведется начало координат как высотных отметок, так и расстояний по осям X, Y. Далее пользовательский файл подгружается в эталонный (относительно системы координат данного файла). Эта система называется точкой съемки, которая привязана к характерной точке на строительной площадке, то есть в данном случае идет привязка к конкретной местности (реальности).

Чтобы настроить файл проекта, для начала необходимо создать эталонный файл, в котором нужно сформировать координаты проектной площадки для дальнейшего экспорта этих координат во все другие файлы проекта – пользовательские файлы для конкретных блоков/корпусов. Эталонный файл можно создавать на любом шаблоне или же без него, задав метрическую систему измерений.

Как уже было сказано ранее, в файле Revit существует начальная внутренняя точка координат, а также две точки, задающие координаты проекта (базовая точка проекта, точка съемки). В начале работы над файлом проекта все эти точки должны находиться в одном месте, однако убедиться в этом не всегда возможно. Точки, задающие координаты проекта, отмечены специальными знаками, однако внутреннее начало координат в Revit не отмечено. Чтобы убедиться, что эта точка совпадает с двумя остальными, воспользуемся DYNAMO, так как в противном случае это может сказаться при: импорте различных файлов в проект; экспорте проекта в другие программные среды; работе со скриптами; формировании отчетов на пересечение, где точки пересечения указаны во внутренней системе координат. Кроме того, если точка начала координат находится слишком далеко от геометрии проекта, это может вызвать технические проблемы, когда при вставке различных элементов в проект они окажутся рядом с этой точкой и далеко от геометрии.

Приступим к настройке проекта. Сначала сделаем видимыми точки координат проекта. Для этого войдем в режим *Скрытые элементы* и, выделив точки, нажмем на кнопку *Показать категорию* на вкладке *Показ скрытых элементов* (рисунок 1). Чтобы убедиться, что внутренняя точка проекта находится там же, где и точки координат, создадим скрипт (с англ. *Сценарий*). При формировании скриптов можно обращаться к внутренней системе координат, создавая объекты в точке начала координат или в любом месте пространства проекта. Также в

эталонном файле необходимо создать оси (пересечение осей A-1), либо пересечение опорных плоскостей. По заданным объектам, впоследствии, будут выравниваться другие файлы.

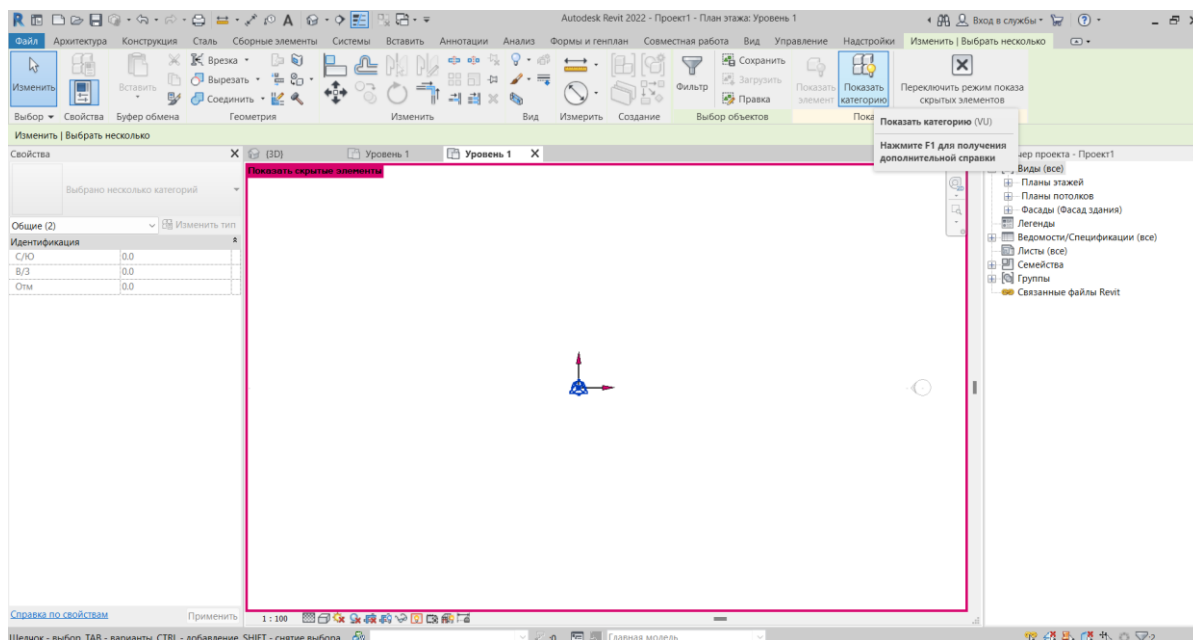


Рис. 1. Показ скрытых элементов.

Для создания скрипта перейдем на вкладку *Управление* и выберем *DYNAMO*, так как скрип будет создаваться заново. Необходимо отметить, что в Revit также предусмотрен *Проигрыватель Dynato*, который позволяет управлять готовыми скриптами. В открывшемся окне нажмем на кнопку *Создать*. Интерфейс создания скриптов в *DYNAMO* состоит из библиотеки готовых функций – ноды (с англ. Узлы) и основного рабочего поля (рисунок 2), где с помощью нодов формируется алгоритм.

Все готовые функции распределены по группам, элементы создания объектов находятся в группе *Revit*. Раскроем эту группу и выберем подгруппу *Elements*, найдем элемент, отвечающий за оси – *Grid*.

В целом, оси можно создавать различными способами, создадим их по начальной и конечной точке (рисунок 3). Появится нод. У каждого нода есть входы и выходы, которые можно подсоединять к другим нодам. Для формирования оси необходимо подключить данные на входе (начальная и конечная точки). Для этого сформируем нод для точек – *ByCoordinates(xyz)* (рисунок 4). Нод *ByCoordinates* формирует точку (на выходе) по координатам (на входе). Создадим две точки для двух осей. Первая точка – с нулевыми координатами x, z и числовым значением y , созданным с помощью код-блока. Для создания код-блока дважды кликнем по рабочему пространству и в появившемся окне введем число,

после чего подсоединим его ко входу по у для первой и второй точек. Далее подсоединим отдельные ноды в сводный нод ввода оси (рисунок 5).

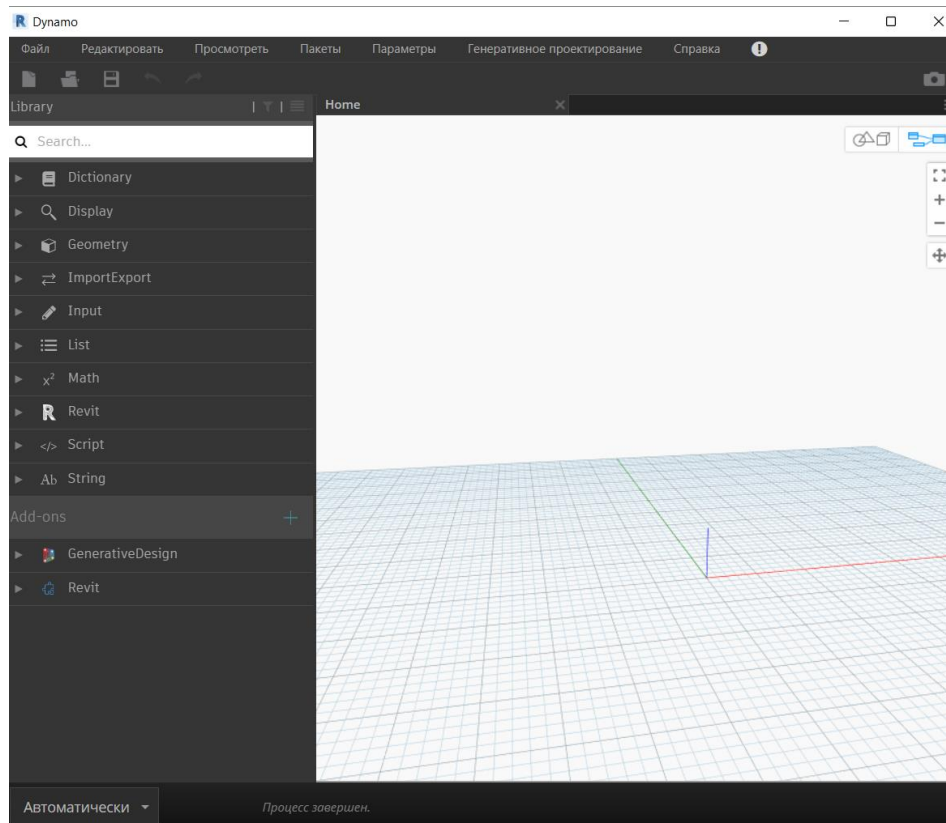


Рис. 2. Рабочее пространство DYNAMO.

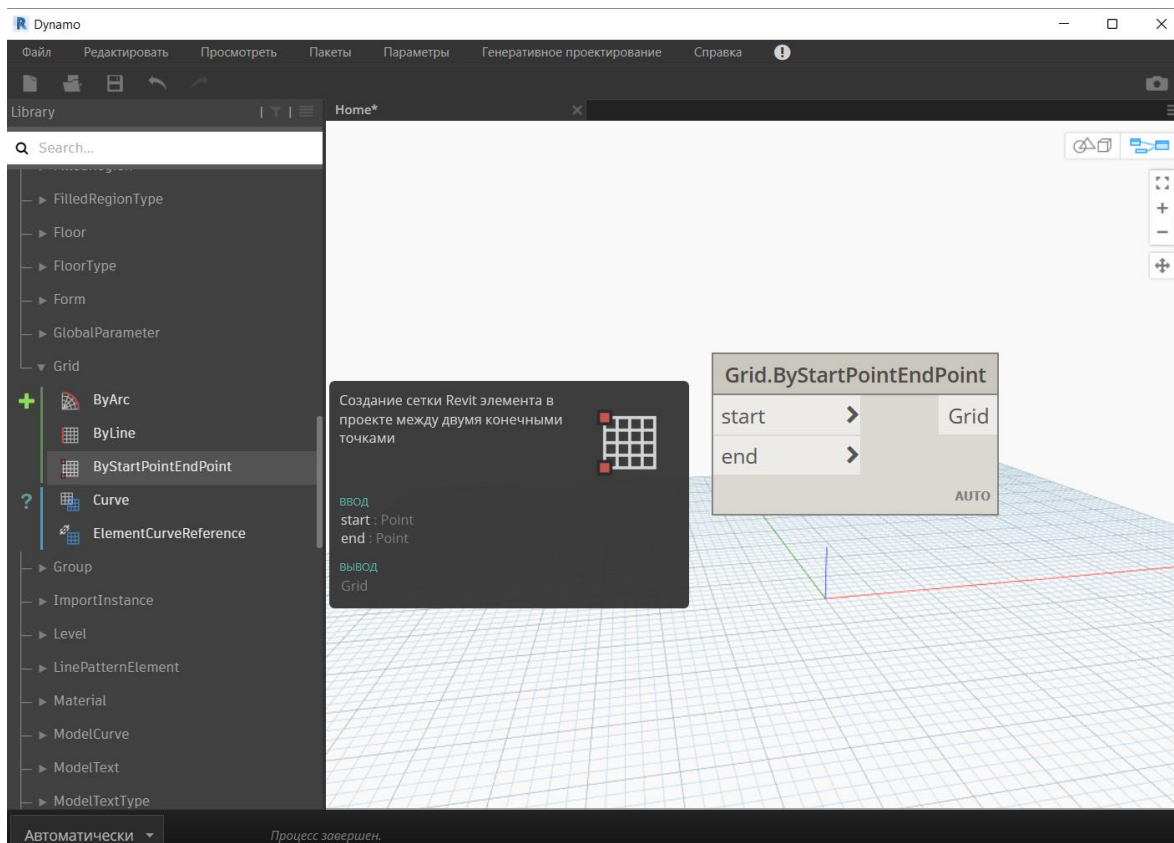


Рис. 3. Скрипт начальной и конечной точек.

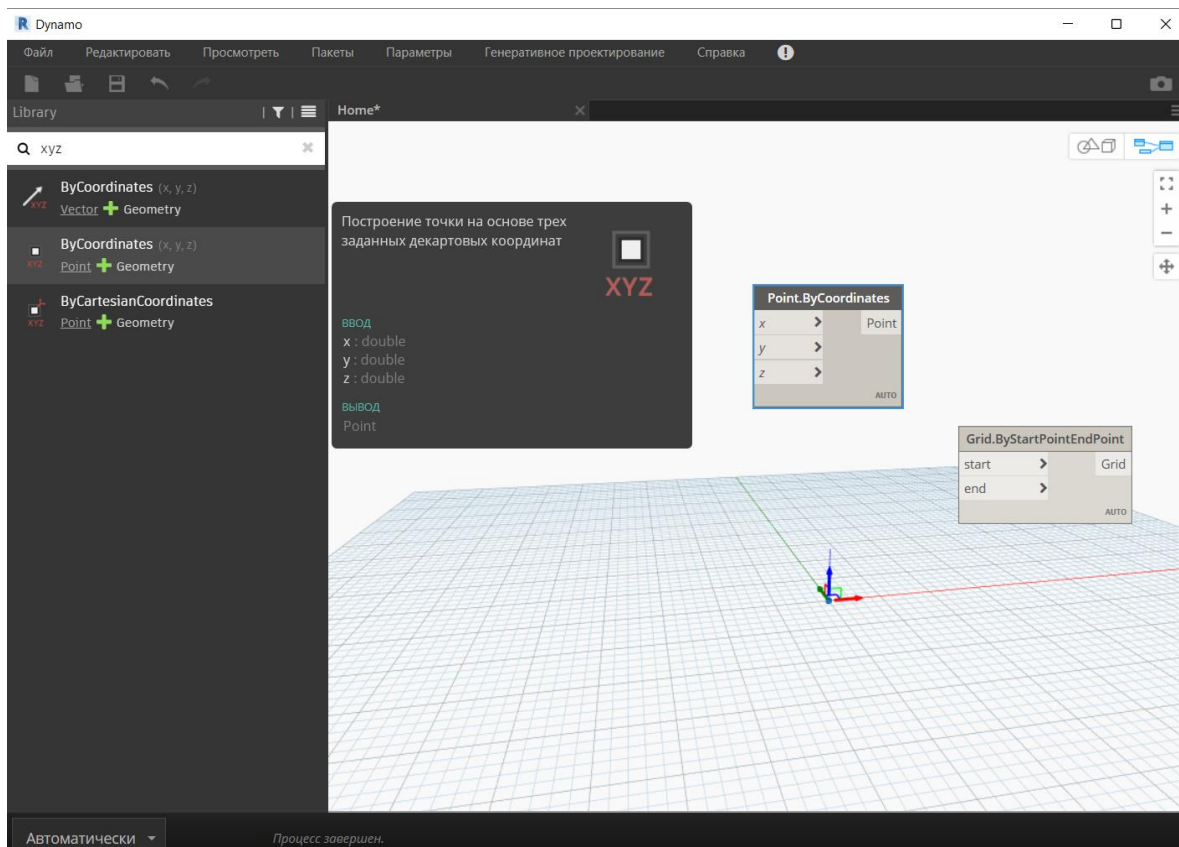


Рис. 4. Формирование начала координат.

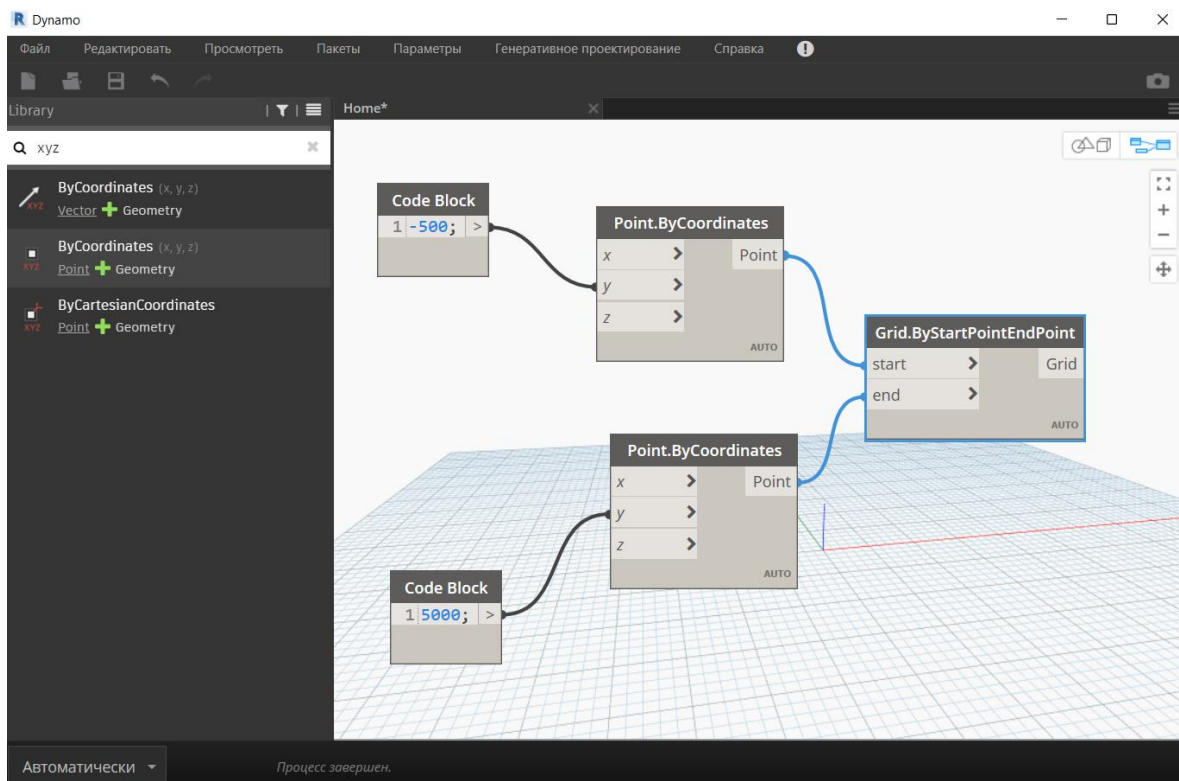


Рис. 5. Задание первой оси.

Для создания второй оси копируем всю группу нодов и поменяем координаты по x (рисунок 6). Оси сформируются, а их пересечение будет находиться ровно в точке съемки

Проверим сформированные оси. В Revit они создаются по порядку, каждая следующая называется в зависимости от предыдущей. Так как при каждом копировании группы нодов в DYNAMO создавались оси, то в результате мы имеем вертикальную ось с обозначением «1» и горизонтальную – «6». Исправим это с помощью скрипта.

Имя параметра зададим через код-блок, введя параметр «Имя». В данном случае необходимо два значения, поэтому скопируем уже созданный нод *List Create* и введем код-блок со значениями «1» и «А». Далее подсоединим группу нодов к третьему входу. Полученное пересечение осей представлено на рисунке 8. Завершаем работу сохранением скрипта, чтобы была возможность использовать его повторно. Для этого воспользуемся командой *Сохранить как...* и сохраним файл скрипта отдельно от файла Revit.

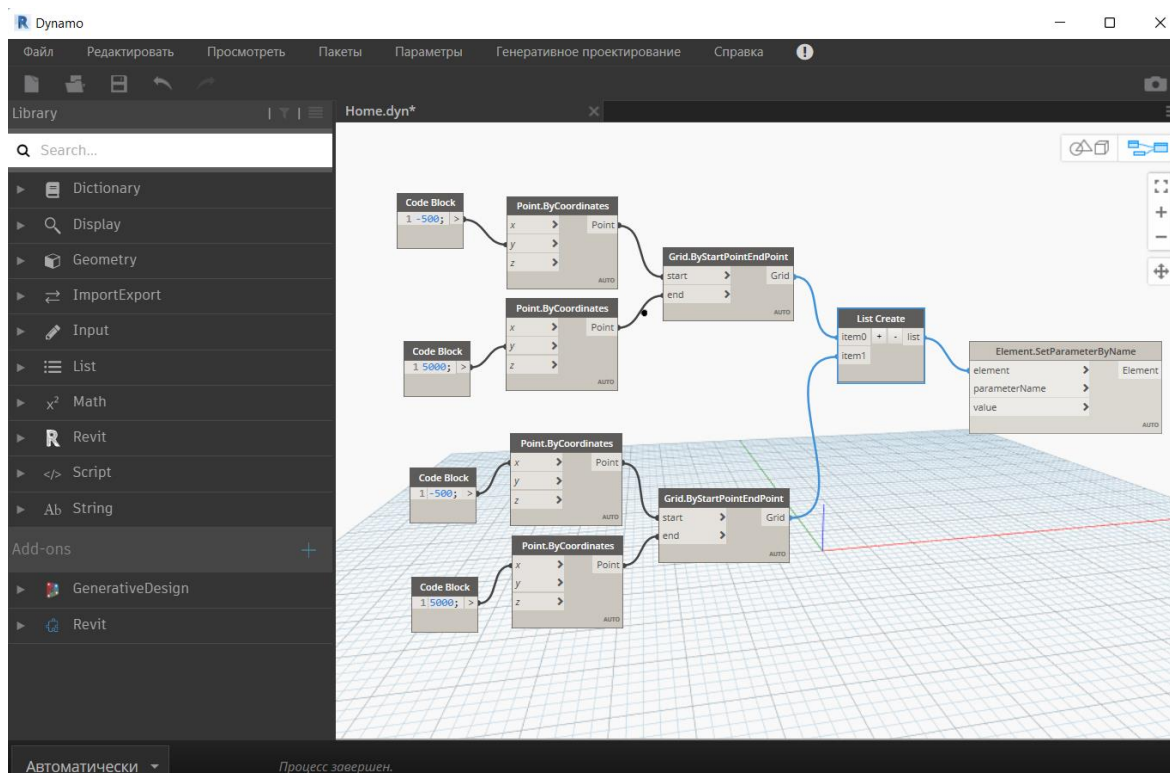


Рис. 7. Подсоединение осей к ноду *SetParameterByName*.

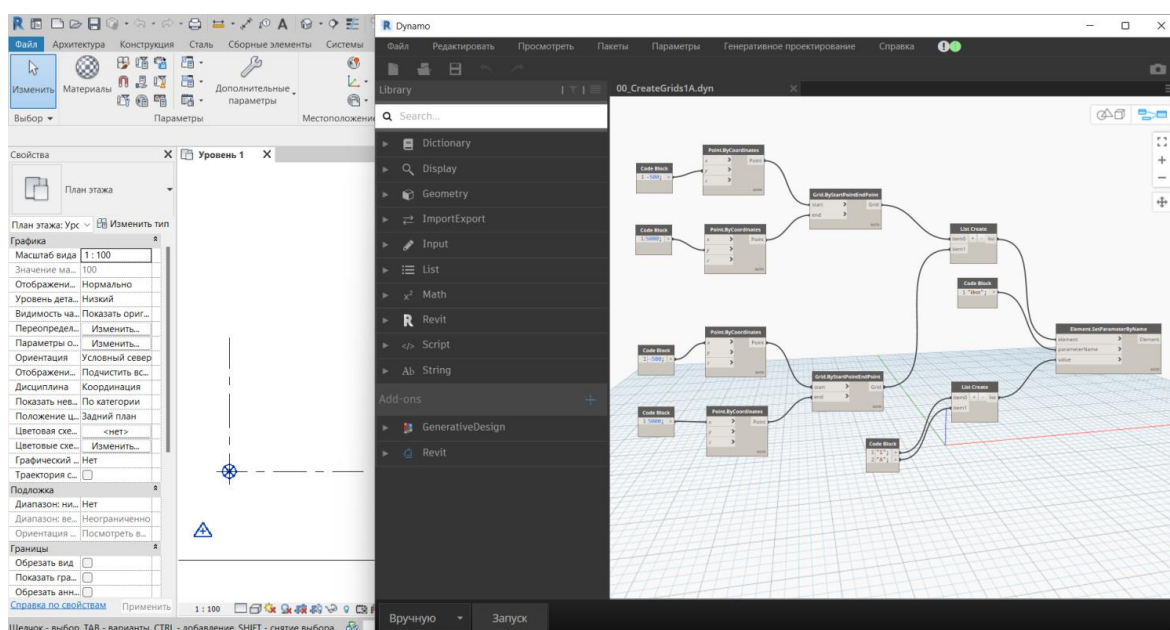


Рис. 8. Создание скрипта в DYNAMO.

По результатам проделанной работы можно сделать вывод, что написание скриптов в DYNAMO для решения тех или иных задач позволяет значительно автоматизировать рабочий процесс. Данный плагин позволяет избежать ошибок и неточностей при экспорте и импорте в другие файлы с собственной системой координат, а также избежать технических проблем при вставке различных элементов в проект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Младзиевский Е. П. Применение программных надстроек в Revit как способ расширения стандартного функционала // ACADEMY. – 2020. – № 2. – С. 9–10.
2. Валенсия Эдгар, Рынкoвская М. И. Расширение моделирования в программе Revit с помощью Dynamo // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам, Йошкар-Ола, 17 – 18 апреля 2015 г. Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2015. – С. 95–97.
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. Каренгин Г. В., Есипов А. В. Dynamo как способ расширения возможностей Autodesk Revit // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Тюмень, 30 ноября 2018 г. Тюменский индустриальный университет. – Тюмень, 2018. – С. 216–218.
5. Лепешкина Д. О., Червова Н. А. Применение инструментов визуального программирования в среде Dynamo для создания и редактирования аналитической модели здания // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы V Междун. науч.-практ. конф.: в 2 частях, 29-30 ноября 2017 г. Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет. – Комсомольск-на-Амуре, 2018. – С. 162–167.
6. Смакаев Р. М., Низина Т. А. Автоматизация задач проектирования с помощью среды визуального программирования DYNAMO STUDIO [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2020. – № 3. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/avtomatizaciya-zadach-proektirovaniya-s-pomoshhyu-sredy-vizualnogo-programmirovaniya-dynamo-studio> (дата обращения 07.03.2023).
7. Смакаев Р. М., Низина Т. А. Применение среды визуального программирования Dynamo при разработке проекта здания в Autodesk Revit // Основы экономики, управления и права. – 2020. – № 2. – С. 48–55.
8. Смакаев Р. М., Низина Т. А. Применение среды визуального программирования DYNAMO при разработке проекта здания в AUTODESK REVIT // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций:

материалы XI Акад. чт. РААСН – Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти первого пред. Науч. совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», почетного члена РААСН, д-ра техн. наук, проф. Зайцева Юрия Владимировича. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – С. 237–247.

АРХИПОВ И. В., БУСАРГИН Д. А., ЛАЗАРЕВ А. Л., ЛАЗАРЕВ Г. А.
АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ РАСЧЕТОВ КОНСТРУКЦИЙ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА

Аннотация. В статье приводится обзор программ численного моделирования на базе метода конечных элементов. Представлен пример практического применения программы FreeCAD для предварительных вычислений с целью определения зон перенапряжения в клее-деревянном композите и результаты испытаний образцов с градиентной структурой, запроектированной по результатам вычислений.

Ключевые слова: деревянные композиты, метод конечных элементов, FreeCAD, клеевой слой, дисперсное армирование.

ARKHIPOV I. V., BUSARGIN D. A., LAZAREV A. L., LAZAREV G. A.
THE RELEVANCE OF THE APPLICATION OF PREDICTIVE CALCULATIONS
OF STRUCTURES BASED ON NUMERICAL MODELING
OF THE COMPOSITE STRUCTURE

Abstract. The article provides an overview of numerical simulation programs based on the finite element method. An example of the practical application of the FreeCAD program for preliminary calculations in order to determine the overvoltage zones in a glue-wood composite and the results of testing samples with a gradient structure designed according to the results of the calculations are given.

Keywords: wood composites, finite element method, FreeCAD, adhesive layer, dispersed reinforcement.

Актуальность прогнозных исследований строительных конструкций не вызывает сомнений. Применение методик вычислений с помощью программных комплексов позволяет спрогнозировать напряженно-деформированное состояние элементов конструкций, акцентированно рассмотреть зоны повышенных концентрации напряжений. «Ручные» методы расчета конструкций не позволяют определиться с участками структуры материала, требующими повышенного внимания конструктора. Базовым методом конструирования структуры материала является метод конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ или FEM-в английской интерпретации) прочно вошел в практику инженерных расчетов при проектировании сложных систем, в том числе в прочностных расчетах элементов строительных конструкций с использованием методов строительной механики. Применение этого метода, реализуемого соответствующим программным обеспечением, существенно сокращает цикл проектирования строительных

конструкций, позволяя исключить большое число экспериментов и опытных проверок, необходимых при использования классических расчетов на основе методов сопромата и строительной механики. Большое число программ в настоящее время оснащаются модулями расчёта на основе МКЭ.

До недавнего времени основной объем вычисления проводился с применением ПО ANSYS, другие CAD-системы со встроенным FEM-модулем значительно проигрывали лидеру. В настоящее время существует множество программ компьютерного инженерного анализа задач строительной механики, позволяющие проводить весь цикл вычислений – кроме уже названного ANSYS, это SolidWorks, Siemens NX, Creo Parametric, Компас 3D, T-Flex и др.).

Вышеуказанные программные продукты имеют большое число достоинств и позволяют реализовать множество задач. Однако у них есть один общий существенный недостаток – существенная стоимость лицензий. Для создания полноценного класса для серьёзного обучения возможностям конкретных программных продуктов и применения их в реальных условиях проектирования требуется значительный объем материальных затрат.

К счастью, есть альтернативные пути применения подобных программ в учебном процессе и проектировании – это свободно распространяемые программы со встроенным модулем МКЭ. В последние годы в развитии свободных систем автоматизированного проектирования (CAD, computer-aided design) наметилась тенденция на включение в рамках одной программы дополнительных модулей, позволяющих сократить количество пакетов, необходимых для проведения полного цикла исследования [1]. Например, CalculiX — открытый, свободный программный пакет, предназначенный для решения линейных и нелинейных трёхмерных задач механики твёрдого деформируемого тела и механики жидкости и газа с помощью метода конечных элементов.

Пакет CalculiX представляет собой набор консольных утилит, включающих препроцессор для подготовки исходных данных, МКЭ-решатель и постпроцессор для обработки результатов [2]. Есть возможность применения CalculiX как самостоятельного продукта, так и в качестве встроенного модуля других продуктов. Особенное место среди таких программ занимает FreeCAD, приобретающий в последнее время все большую популярность не только среди начинающих проектировщиков, но и в среде профессионалов.

Можно было бы предположить, что свободно распространяемые программы дают менее точный результат. Однако многими проектировщиками и конструкторами данное предположение категорически опровергается – результаты аналогичных вычислений в лицензионных ПК ANSYS и Solidworks, а также выполненные с помощью CalculiX, ElmerFEM (солверы FreeCAD) сходились с высокой степенью. Хотя надо признать, что формирование

задания, построение и контроль результатов удобнее реализовывать в коммерческих программах.

Во FreeCAD по умолчанию используются те же элементы, что и в Solidworks Simulation – тетраэдры с промежуточными узлами. В ПК Компас есть бесплатная версия с менее точными элементами – тетраэдрами без промежуточных узлов, более чувствительными к качеству сетки.

Особенности CalculiX, которые могут рассматриваться как преимущества: наличие всех основных функций, присутствующих у платных аналогов; FreeCAD/CalculiX позволяет провести полный цикл исследования в рамках одной программы, а также параметризацию задачи на языке программирования Python; в качестве отдельной программы содержит пре/постпроцессор (создание геометрии и расчетной сетки по командному файлу, визуализация данных по файлу результатов расчетов); не требует навыков программирования; имеет быстрые итерационные методы с преобуславливанием [1].

И все же у данного комплекса есть и недостатки: непонятный интерфейс для пользователей других программ (интерфейс выглядит как меню программы из 2010 года, но все же остается интуитивно понятным для новичков); «сырость» продукта (FreeCAD все еще находится на стадии создания; части инструментария сразу после скачивания нет, поэтому приходится все дорабатывать патчами и модулями).

В данной работе FreeCAD использовался для изучения напряженно-деформированного состояния слоистого композита – деревянной изгибаемой балки, усиленной системой внешнего армирования (СВА) (рис. 1).

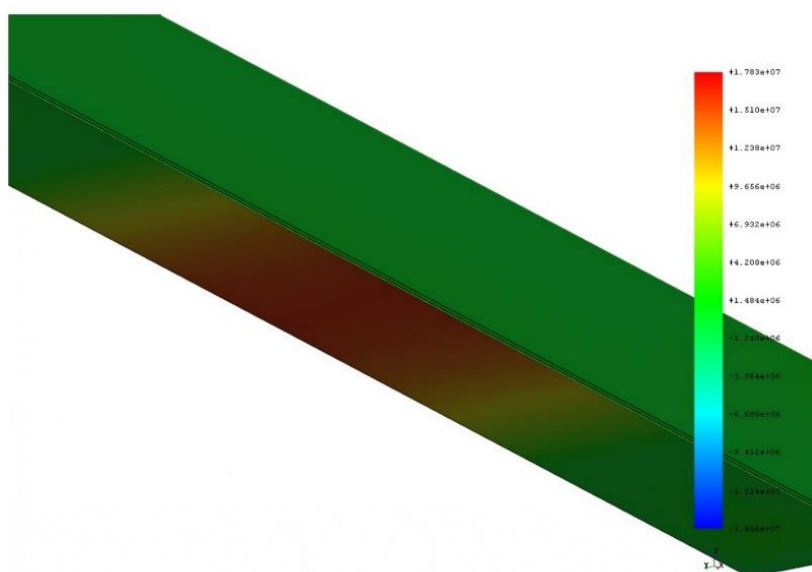


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние изгибаемого деревянного композита с системой внешнего армирования (углеродная лента FibArm, ПК FreeCAD).

Одним наиболее современных и прогрессивных методов усиления строительных конструкций является армирование с помощью систем внешнего армирования. 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;
- выявление дефектов, возникающих при изготовлении клееных конструкций.

Номенклатура армирующих элементов для клееных деревянных конструкций достаточно обширна: вариант вклеенной арматуры, который выполняют из металлических и полимерных стержней; листовая арматуры системы внешнего армирования и вклеенная межслойная арматура из листовых элементов, холстов из волокон стекло- и углепластика [3]. Большепролетные клееные армированные конструкции, обладающие низким весом и значительной несущей способностью, 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. К наиболее перспективным материалам для армирования деревянных клееных конструкций относят арматуру из стекло- и углеволокна [4].

Интегрирование в клеевой слой высокомодульного волокна позволяет значительно повысить надежность работы композита. В традиционных клееных деревянных конструкциях по границе клеевого слоя, соединяющего слои древесины и арматуры, возникают неравномерные объемные деформации, поскольку в процессе эксплуатации возможны воздействия перепадов температуры и влажности, агрессивных сред, повторной кратковременной и длительной нагрузок и др.

С другой стороны, известно, что в слоистых композитах на границах слоев возникают значительные сдвиговые усилия. Кроме того, усилия, воздействующие на непрерывные связи соединительного слоя, работающие на сдвиг, передаются неравномерно. Перенапряженными являются крайние участки, где возникает опасность разрушения. Модель участка с зонами перенапряжения, полученная с помощью FreeCAD, представлена на рисунке 2.

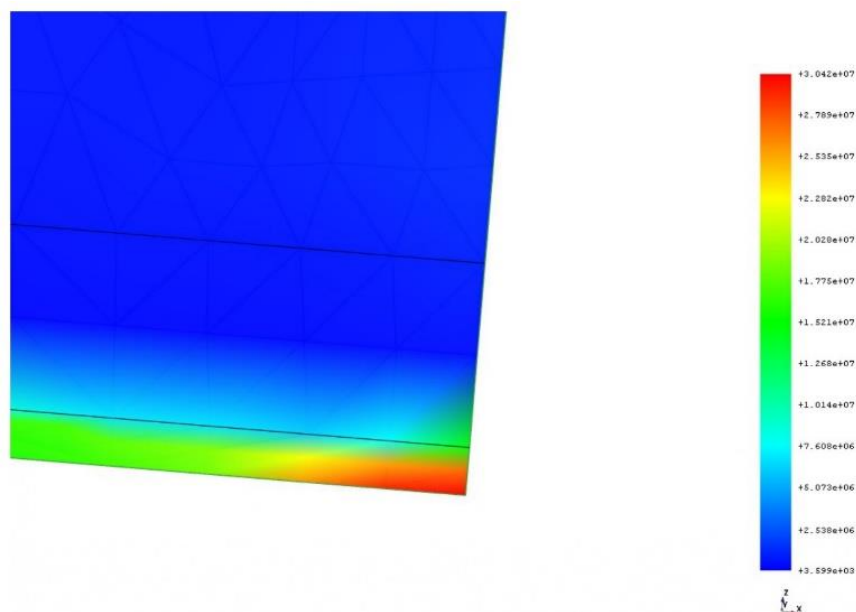


Рис. 2. Зона повышенных напряжений слоистого деревянного композита с СВА.

Устранить это обстоятельство можно путем усложнения конструкции соединения (геометрии и деформативных свойств связей). Одним из способов решения этой проблемы может быть направленное изменение характеристик клеевого слоя за счет введения в его состав высокодисперсного наполнителя, например, углеродного волокна.

В работе [5] было предложено характер изменения свойств клеевого шва выполнять, основываясь на зависимостях, получаемых исходя из решения дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} (\sigma_y - \nu\sigma_x) \frac{\partial^2 a^2}{\partial x^2} - 2(1 + \nu)\tau_{xy} \frac{\partial^2 a}{\partial x \partial y} + (\sigma_x - \nu\sigma_y) \frac{\partial^2 a^2}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial(\sigma_x - \sigma_y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial a}{\partial x} + \\ + 2 \frac{\partial(\sigma_x - \sigma_y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial a}{\partial y} + a \nabla^2 (\sigma_x - \sigma_y) = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где a – коэффициент деформации (коэффициент податливости), который является функцией координат и представляет собой величину, обратную модулю упругости $E = E(x, y)$.

Задавая желаемый характер распределения напряжений в объеме композита, можно получить закон распределения модуля упругости E по сечению образца. В наших экспериментах в качестве материалов для изготовления образцов использовались [6]: эпоксидная смола ЭД-20, активный разбавитель Этал-1, нетоксичный отвердитель аминного типа Этал-45М, который рекомендован к применению при изготовлении антикоррозионных покрытий, стеклопластиковых изделий методом контактного формования; однонаправленные ленты и высокодисперсный наполнитель на основе волокна FibArm. Степень наполнения клеевой композиции изменялась по длине композита с учетом зависимостей, полученных по результатам вычислений, и согласно схемам, построенным с помощью программного комплекса FreeCAD. Результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний

№	Прочность при изгибе, МПа	Среднее по серии, МПа	Характер разрушения	Изменение характеристик прослойки
KI-1	330,75	309,79	Разрушение по нормальному сечению в середине пролета после отрыва арматуры, начало отрыва на торце образца	Один слой углеродной ленты с однородным по длине клеевым слоем
KI-2	316,05			
KI-3	330,75			
KI-4	301,35			
KI-5	278,48			
KI-6	301,35			
KV-5	291,1	361,99	В середине пролета по нормальному сечению, с разрывом арматуры	Функционально направленное изменение свойств прослойки
KV-6	429,2			
KV-7	312,38			
KV-8	330,75			
KV-9	257,25			
KV-10	451,25			

Проведенные исследования наглядно показали, каким образом прогнозные вычисления, выполненные программным комплексом с встроенным решателем по методу конечных элементов, позволяют определить зоны акцентированного воздействия на композит с целью ее оптимизации и получения оптимальной структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Насибуллаев И. Ш. Применение свободных программ FreeFem++/Gmsh и FreeCAD/CalculiX для моделирования статических задач упругости // Многофазные системы. – 2020. – № 3-4. – С. 183–198.
2. Притыкин Д. Изучаем сопрогат с CalculiX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/423359/> (дата обращения 05.03.2023).
3. Евстигнеева В. М., Куприяшкина Л. И., Лазарев А. Л. Деревянные слоистые элементы с неоднородно-слоистой структурой [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2020. – № 3. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/derevyannye-sloistye-elementy-s-neodnorodno-sloistoj-strukturoj> (дата обращения 05.03.2023).
4. Лазарев А. Л. Создание градиентных покрытий с применением элементов внешнего армирования из углеволокна // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – С. 68–71.
5. Какурин И. Р., Лазарев А. Л., Шорин М. А. Создание градиентных покрытий с комплексом свойств, обеспечивающих стойкость к эксплуатационным воздействиям [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2015. – № 13. – Режим

доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/sozdanie-gradientnyx-pokrytij-s-kompleksom-svojstv-obespechivayushhix-stojkost-k-ekspluatacionnym-vozdйствиyam> (дата обращения 05.03.2023).

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. – 2018. – № 9. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskaya-realizaciya-metodov-proektirovaniya-vneshnego-armirovaniya-derevyannyx-elementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnyx-kompozicionnyx-materialov> (дата обращения 05.03.2023).

КУПРИЯШКИНА Л. И., ЛИЯСКИН О. В., МУХАНОВ М. А., АХМЕТЖАНОВ Р. А.

ВАКУУМНО-ПОРОШКОВАЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ ТЕРМОКОНТЕЙНЕРОВ

Аннотация. Рассмотрены возможности применения вакуумных теплоизоляционных панелей (ВИП-панелей) для создания высокоэффективной тонкостенной теплоизоляции в термоконтейнерах. Показана эффективность использования в вакуумной теплоизоляции мелкодисперсного наполнителя, представлена схема основных конструктивных элементов. Определено максимальное время термостатирования при определенных условиях эксплуатации материала. Экспериментально доказано, что разработанный термоконтейнер не уступает по характеристикам аналогичным продуктам.

Ключевые слова: вакуумная панель, наполнитель, теплопередача, термоконтейнер, температура, испытания, вакуумно-порошковая теплоизоляция, теплопроводность, теплоизоляционный материал.

KUPRIYASHKINA L. I., LIASKIN O. V., MUKHANOV M. A., AKHMETZHANOV R. A.

VACUUM-POWDER THERMAL INSULATION OF THERMAL CONTAINERS

Abstract. The use of vacuum thermal insulation panels (VIP-panels) to create highly efficient thin-walled thermal insulation in thermal containers is considered. The efficiency of using fine filler in vacuum thermal insulation is shown, a diagram of the main structural elements is presented. The maximum temperature control time is determined under certain operating conditions of the material. It has been experimentally proved that the developed thermal container is not inferior in characteristics to similar products.

Keywords: vacuum panel, filler, heat transfer, thermal container, temperature, tests, vacuum-powder thermal insulation, thermal conductivity, thermal insulation material.

Одним из основных направлений современной науки является создание новых эффективных, экологически чистых теплоизоляционных материалов. Поэтому крайне важными становятся исследования процессов переноса тепла в теплоэнергетике, строительстве и химической промышленности с целью прогнозирования тепловых потерь в различных условиях эксплуатации, создание методов расчета ограждающих конструкций, энергопотребляющих и генерирующих устройств, работающих при тяжелых температурных режимах. Основным требованием к теплоизоляционным материалам энергосберегающих систем, наряду с экологичностью, низкой себестоимостью и пожароустойчивостью является минимальная величина теплопроводности.

Принципы создания теплоизоляции с вакуумированием порошковых материалов базируются на глубоком понимании физических процессов переноса тепла. Механизмы

переноса тепла в зернистых системах реализуются в трех разновидностях. Основным механизмом переноса тепла в твердых телах – кондукционный. Этот механизм в газах наблюдается в тех случаях, когда быстрые молекулы теплого слоя газа сталкиваются с медленными молекулами соседнего холодного слоя. В результате возникает поток тепла. Газы из легких молекул (водород) проводят тепло лучше, чем тяжелые газы (азот). Следовательно, вид газовой среды в объеме будет влиять на теплопроводность панели.

Путем конвекции теплоперенос осуществляется только в газах и жидкостях и основан на том, что при нагревании газа его плотность уменьшается. При неравномерном нагревании более легкие слои поднимаются, тяжелые опускаются. Вертикальный поток теплоты, связанный с этим движением, как правило, значительно превышает поток, связанный с кондукционной теплопроводностью. Излучение – это механизм передачи теплоты электромагнитными волнами. Способность тела излучать и поглощать электромагнитные волны определяется его атомной структурой.

Вакуумная технология позволяет исключить все три механизма передачи тепла. Теплопроводность газов практически не зависит от давления до тех пор, пока длина свободного пробега молекулы газа не становится сравнимой с размерами полости, в которой находится газ. Это обстоятельство требует создания глубокого вакуума для существенного снижения теплопроводности прослойки между разделяемыми средами и послужило основой для применения мелкопористых материалов в качестве теплоизоляции.

Использование мелкодисперсных пористых материалов позволяет решить задачу создания утеплителей с чрезвычайно малым значением коэффициента теплопроводности при гораздо менее жестких требованиях к конструкции теплоизоляционной системы и степени разрежения воздуха. Основную роль в процессе передачи тепла в пористых порошковых структурах играет давление газа, находящегося в порах, размер частиц и пор, пористость, элементный состав порошка, температура и влажность. Наиболее перспективными для создания ВИП панелей представляются кремнегели на основе диатомитов с размером частиц $5 \cdot 10^{-3}$ мм, а также перлит с высокой степенью пористости, достигающей для вышеуказанных материалов 95 %. Коэффициент теплопроводности этих материалов не превышает 0,003 Вт/(м·К), что на порядок ниже, чем у традиционно используемых теплоизоляционных материалов.

Вакуумные теплоизоляционные панели – это теплоизоляция будущего [1, 2]. ВИП-панели имеют коэффициент теплопроводности $\lambda=0,002 \div 0,009$ Вт/(м·К), а известные аналоги значительно выше, в частности: пенополистирол – $0,038 \div 0,052$ Вт/(м·К), экструдированный пенополистирол – $0,029 \div 0,032$ Вт/(м·К), минеральная вата – $0,035 \div 0,045$ Вт/(м·К), каменная вата – $0,034 \div 0,039$ Вт/(м·К). Благодаря высоким теплозащитным характеристикам вакуумные

теплоизоляционные панели дают возможность создавать высокоэффективные тонкостенные теплозащитные конструкции, позволяющие экономить полезное пространство. С учетом данного преимущества ВИП-панели рекомендуется применять не только в строительстве жилых домов, но и в промышленных, административных, спортивных зданиях, сооружениях, в автомобиле-, авио-, судо-, ракето-, вагоностроении, при производстве холодильного и морозильного оборудования, контейнеров для транспортировки чувствительных к изменению температуры объектов.

При разработке и проектировании термоконтейнеров основными задачами являются не только повышение длительности сохранения заданной температуры в объеме термоконтейнера, но и наиболее полное использование объема рабочей камеры. На рынке представлены термоконтейнеры различной формы, типов и размеров. Они находят применение в медицинской, фармацевтической, пищевой промышленности, используются для перевозки грузов, требующих поддержания определенных температурных условий на протяжении всего периода доставки, а именно термонеустойчивых лекарственных средств, трансплантатов, биоматериалов, вакцин, сывороток, иммунобиологических препаратов, крови, кровезаменителей, материалов медицинского назначения и многих других, транспортировка которых возможна в условиях только высоких или низких температур.

Известны решения, когда термоконтейнер изготовлен в виде емкости, содержащей защитные оболочки, которые выполнены из текстильного материала, между слоями которых размещен теплоизоляционный материал из пенополистирола, пенополиуретана [3] или в виде термобокса с оболочками из гофрокартона [4]. Недостатком известных моделей является использование пенополистирола и пенополиуретана, которые не отвечают требованиям по огнестойкости, имеют низкий срок службы. Применение вакуумной теплоизоляции, где в качестве наполнителя используется дисперсный наномодифицированный материал, позволяет решить эти проблемы.

Общий поток тепла в волокнистых материалах складывается из трех составляющих: кондуктивного переноса тепла по волокнам, молекулярного и лучистого переноса тепла в пространстве между волокнами. Доля каждой составляющей зависит от теплопроводности волокон, газа-наполнителя, пористости материала, диаметра, плотности, дефектности, шероховатости и фрактальности поверхности волокон, температуры и влажности среды. Возрастание температуры вызывает увеличение молекулярной и лучистой составляющих коэффициента теплопроводности, что позволяет вакуумно-порошковую теплоизоляцию активно применять в термобоксах, производимых инновационными предприятиями зарубежных стран. На рисунке 1 представлены основные конструктивные элементы термоконтейнера.

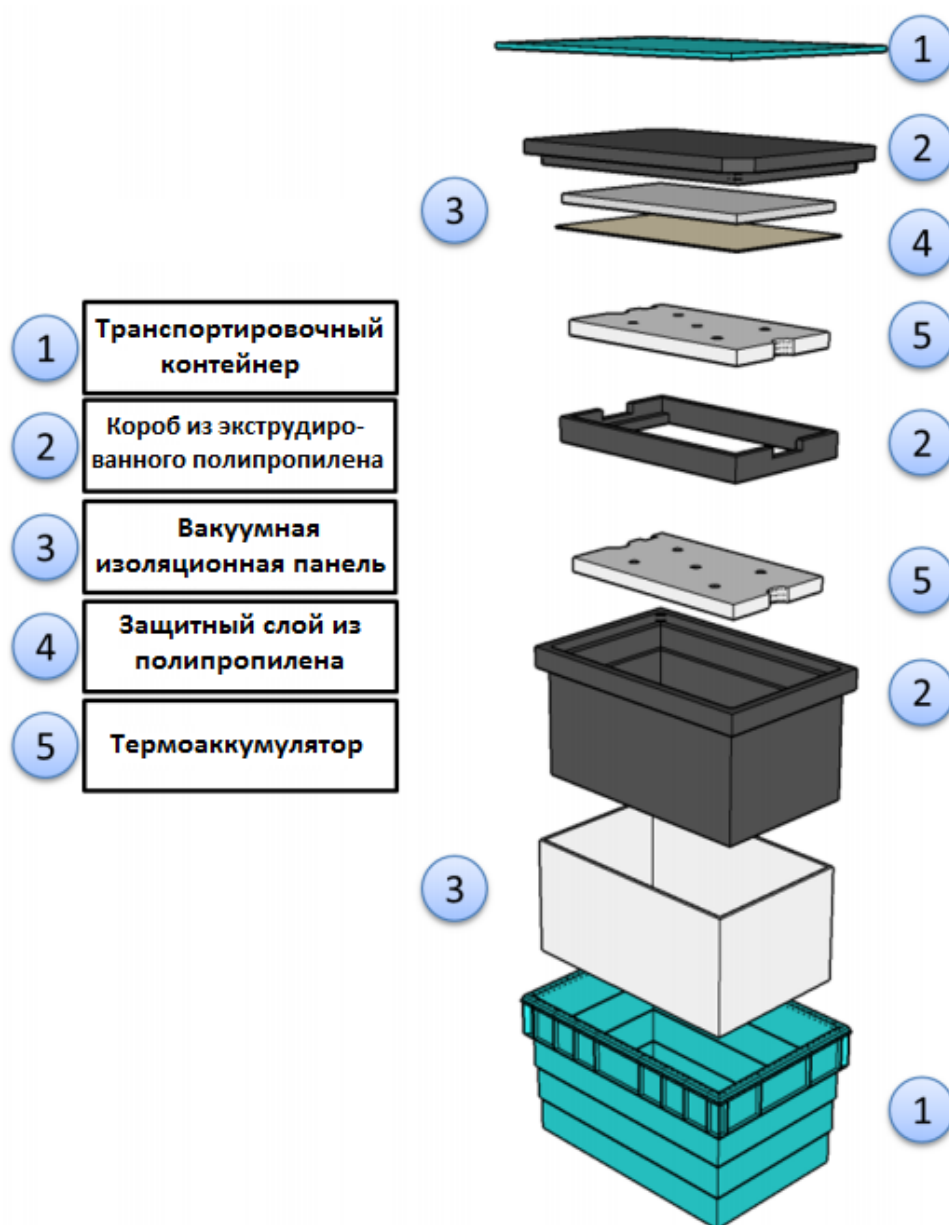


Рис. 1. Основные конструкционные элементы термоконтнера.

Коллективом кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» под руководством академика РААСН В. П. Селяева предложена новая конструкция термоконтнера, представляющая из себя ударопрочный корпус из полипропилена в виде параллелепипеда или усеченной пирамиды с откидной крышкой и рабочей камеры (рис. 2). Корпус выполнен в виде многослойной конструкции, состоящей из несущей оболочки, термоизолирующих материалов – пенополиуретан, вакуумная теплоизоляционная панель, отражающая мембрана. Откидная крышка закреплена на корпусе с помощью петель и закрывается с помощью уплотняющих защелок. Термоконтнер снабжен транспортировочными ручками, расположенными на корпусе, либо на откидной крышке (в зависимости от размера контейнера). Главной особенностью предлагаемого решения является

применение в качестве основного теплоизолирующего материала панели с высокими эксплуатационными свойствами толщиной 10-20 мм, выполненной из вакуумированного наноструктурированного наполнителя [5], упакованного в термостойкую полимерную пленку, которая в свою очередь «замоноличена» в пенополиуретан.

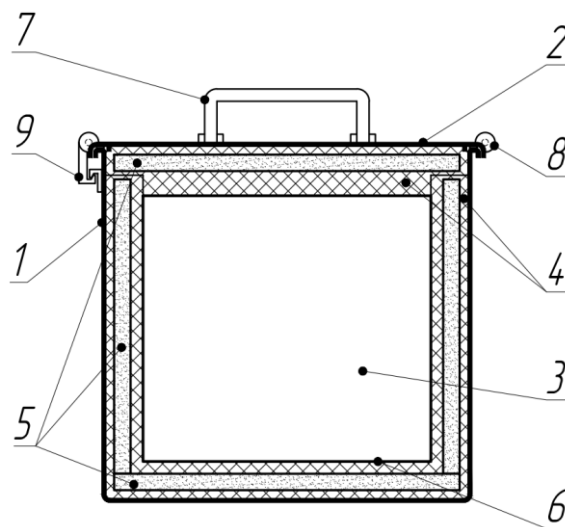


Рис. 2. Термоконтeйнер, разработанный в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»:
 – ударопрочный корпус; 2 – откидная крышка; 3 – рабочая камера;
 – пенополиуретан; 5 – вакуумная теплоизоляционная панель; 6 – отражающая мембрана;
 – транспортировочные ручки; 8 – петли; 9 – защелки.

Для предлагаемого термоконтeйнера были проведены исследования, заключающиеся в выявление максимального времени термостатирования при определенных условиях. В качестве хладоэлементов в первом эксперименте (рис. 3) применялись аккумуляторы холода (соответствие температуры холода от +2 до +8 °С не допуская замораживания (статья ОФС 1.1.0010.18 «Хранение лекарственных средств» Государственная Фармакопея (ГФ) XIV издания СП 3.3.2.3332-16 «Условия транспортирования и хранения иммунобиологических лекарственных препаратов»). Во втором эксперименте (рис. 4) – отрицательные температуры (лед), до +8 °С (Федеральный закон N 61-ФЗ «Об обращении лекарственных средств» Собрание законодательства Российской Федерации, 2010, N 16, ст. 1815; N 31, ст. 4161) «Правила хранения лекарственных сред». Графики термостатирования представлены на рисунках 3, 4.

Время термостатирования при температуре от +2 до + 8 °С достигло 156 часов (рис. 3), а таяние льда наблюдалось через 276 часов. Полученные результаты соответствуют показателям контейнеров с традиционными утеплителями.

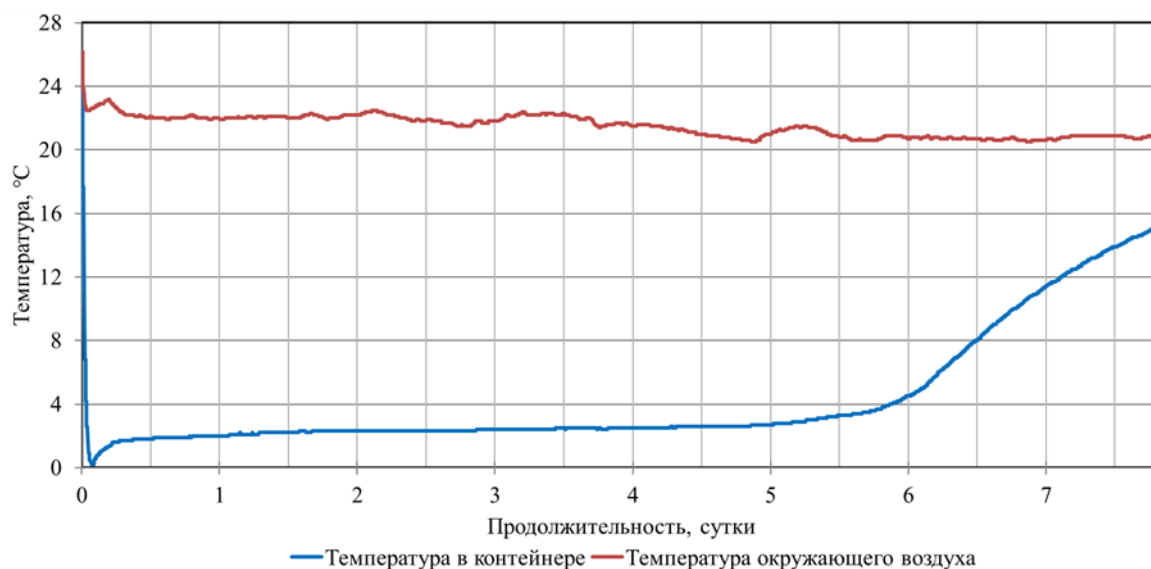


Рис. 3. Термостатирование при температуре от +2 до + 8 °C.

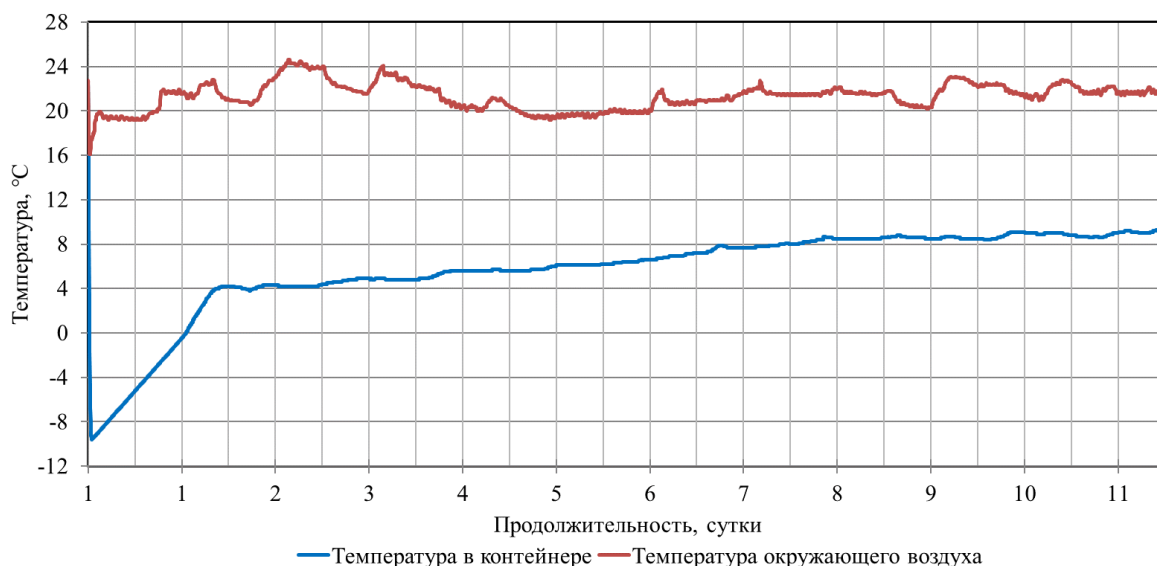


Рис. 4. Испытания термоконтейнера со льдом.

Вывод: Использование в термоконтейнерах вакуумно-порошковой теплоизоляции по сравнению с известными решениями позволяет: повысить теплозащитные свойства контейнера; гарантирует более рациональное использование объема рабочей камеры; повысить время термостатирования перевозимых режимных грузов как при пассивном применении, так и при использовании контейнера с термоаккумуляторами.

В отличие от обычной односторонней упаковки или дорогостоящих перевозок специальными рефрижераторными транспортными средствами, транспортировочные системы с ВИП-панелями являются многоразовыми и, благодаря тому, что изолирующее ядро состоит из натуральных материалов, они на 100% поддаются утилизации и не оказывают вредного воздействия на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селяев П. В., Киселев Н. Н., Лияскин О. В. Принципы создания порошковой теплоизоляции на основе микрокремнезема // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3. – С. 55–59.
2. Пат. 150467 Российская Федерация, МПК E04C 2/02, F16L 59/06 Вакуумная теплоизоляционная панель / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, В. А. Неверов, Е. И. Куприяшкина; заявитель Мордов. гос. ун-т им. Н.П. Огарёва. № 2014133568/03; заявл. 14.08.2014; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.
3. Пат. 152221 Российская Федерация, МПК A47J 39/02, A47J 41/02, B65D 81/38 Термоконтейнер / М. С. Зуев; заявитель Зуев Михаил Степанович. № 2014121206/12; заявл. 26.05.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл № 13.
4. Пат. 2330220 Российская Федерация, МПК F25D 3/08, B65D 81/38 Термоконтейнер-сумка / А. И. Грядунов, И. В. Раков, И. Б. Родионова; заявитель ЗАО «Удел». № 2006141534/12; заявл. 27.11.2006; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21.
5. Куприяшкина Л. И., Карандашов Д. Л., Муханов М. А. Влияние составляющих вакуумных теплоизоляционных панелей на их теплопроводность // XLIX Огарёвские чтения: материалы научной конференции / Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва. – Саранск, 2021. – С. 506–511.

ОРЛОВА Я. А., НИЗИНА Т. А., НИЗИН Д. Р., СПИРИН И. П.
ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА РАЗРАБОТКИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ

Аннотация. Рассмотрены два основных направления разработки строительных материалов с фотокаталитическим эффектом – составы покрытий с эффектом самоочищения, а также модификация существующих материалов путем введения в их состав фотокатализаторов. Приведены примеры использования различных видов фотокатализаторов при разработке материалов, характеризующихся эффектом самоочищения, а также примеры их реального внедрения.

Ключевые слова: строительные материалы, загрязнение, фотокатализатор, самоочищающиеся материалы, фотокаталитический эффект.

ORLOVA YA. A., NIZINA T. A., NIZIN D. R., SPIRIN I. P.
AN OVERVIEW OF RUSSIAN AND INTERNATIONAL EXPERIENCE IN THE
DEVELOPMENT OF BUILDING MATERIALS WITH PHOTOCATALYTIC EFFECT

Abstract. Two main directions of the development of building materials with a photocatalytic effect are considered. These are compositions of coatings with a self-cleaning effect and modification of existing materials by introducing photocatalysts into their composition. The paper gives examples of the use of various types of photocatalysts in the development of materials characterized by the effect of self-cleaning and examples of their real life implementation.

Keywords: building materials, pollution, photocatalyst, self-cleaning materials, photocatalytic effect.

В урбанистических системах нашего времени тесно соседствуют друг с другом промышленные предприятия, жилые здания, административные и культурные объекты. Близкое расположение промышленных зон к жилым районам приводит к увеличению содержания токсичных и вредных веществ, загрязняющих воздух и наносящих вред здоровью людей. По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году» в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха проживает 50,6 млн чел., что составляет 46% городского населения [1].

Основными загрязняющими веществами являются диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, углеводороды. Они поступают в атмосферный воздух вместе с выбросами загрязняющих веществ предприятий различных отраслей промышленности и транспорта. Источники загрязняющих веществ делятся на передвижные и стационарные. К передвижным

источникам относятся автомобильный, железнодорожный, авиационный и водный виды транспорта. К стационарным относят все объекты, которые производят выброс вредных веществ в атмосферу и не подлежат перемещению. По данным [1], общий объем выбросов загрязняющих веществ в 2021 году увеличился на 0,3%, а выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников увеличились на 1,5% по сравнению с уровнем 2020 года.

Приоритетными факторами риска являются взвешенные частицы, которые находятся в воздухе [2]. Они поступают в атмосферный воздух вместе с выбросами предприятий различных отраслей промышленности и транспорта. Со временем эти частицы оседают на поверхность зданий. Если поверхности не очищаются, пыль, влага и пятна становятся благотворной средой для роста микроорганизмов и бактерий. Таким образом, увеличивается опасность для здоровья человека.

Накопившиеся со временем частицы пыли, смешиваясь с водой, под действием силы тяжести, начинают перемещаться вдоль поверхности фасада, образуя разводы. В некоторых случаях загрязняющие вещества способны проникать в структуру покрытия. Например, в работах [3; 4] описано влияние пыли на конструкции вентилируемых фасадов. Это может привести не только к потере эстетического вида здания, но и к изменению физико-механических свойств строительных материалов, использованных при отделке фасада.

Применение самоочищающихся фотоактивных покрытий способствует рациональному использованию природных ресурсов в области строительства. В основе механизма действия таких поверхностей лежит принцип гетерогенного фотокатализа. К фотокаталитическим реакциям в гетерогенных системах относят реакции превращения исходных реагентов в продукты реакции под действием квантов света на поверхности фотокатализатора при условии его неизменности в конце цикла превращений. В большинстве случаев твердое тело является фотокатализатором, поглощающим свет, а фотокаталитические реакции протекают на границе раздела «твердое тело – газ» или «твердое тело – жидкость» [5]. В условиях городской среды этот процесс может протекать следующим образом: под воздействием солнечного света на поверхности, покрытой фотокатализатором, происходит процесс окисления загрязняющих веществ, осевших на поверхность; затем продукты реакции удаляются при помощи дождевой воды под действием силы тяжести.

Одним из самых известных объектов, при строительстве которого был использован бетон с самоочищающимися свойствами, является церковь Dives in Misericordia в Риме (проект был реализован в 2003 году). Для сохранения белого цвета в бетон был добавлен диоксид титана. Фотокаталитические цементы были использованы при строительстве таких объектов, как: Cité de la Musique в Шамбери (Франция, 2003 год), школы в городе Мортара (Италия, 1999 год), многоэтажных жилых комплексах в Остенде (Бельгия) [6].

В настоящее время во всем мире ведутся разработки строительных материалов, модифицированных фотокаталитическими добавками. Наиболее распространены фотокатализаторы на основе диоксида титана. Составы на его основе характеризуются высокой фотокаталитической активностью, низкой стоимостью, высокой химической стабильностью и отсутствием токсичности. Диоксид титана существует в трех модификациях: анатаз, брукит, рутил; в качестве фотокатализатора преимущественно используется в анатазной форме. Однако, как фотокатализатор, диоксид титана имеет и ряд недостатков, основным из которых является и то, что под действием видимого излучения эффективность его работы составляет менее 10% [5–9].

Анализ научной литературы показал, что можно выделить два основных направления разработки строительных материалов с фотокаталитическим эффектом. Первая группа объединяет исследователей, работающих над получением составов с эффектом самоочищения, которые можно наносить на различные поверхности в качестве тонких покрытий. Вторая группа нацелена на модификацию существующих материалов путем введения в состав фотокатализатора.

В работе [10] рассматривается процесс получения добавки нанодисперсного диоксида титана. Установлено, что диспергирование пигментного порошка диоксида титана анатазной формы в водной среде олеата натрия способствует получению более устойчивой суспензии. На основе экспериментальных исследований была доказана способность покрытия к деструкции красителей на поверхности образцов.

В [11] представлены результаты исследования влияния добавки фотокаталитического композиционного материала системы $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ на свойства цементного камня. Фотокаталитический композит $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ был получен золь-гель методом, где в качестве прекурсора использовали тетрабутоксититан, а в качестве кремнеземного сырья как подложки – диатомитовый тонкодисперсный порошок. Было выявлено, что при сохранении прочности при сжатии, образцы с синтезированной добавкой характеризуются способностью к самоочищению на уровне, близком к образцу с промышленным наноразмерным фотокатализатором.

В работе [12] исследованы самоочищающиеся покрытия с регулируемой, посредством прокаливании и воздействия ультрафиолетового излучения, адгезионной и гидрофобной способностью. Аморфные микросферы SiO_2 (A- SiO_2) и наночастицы TiO_2 (N- TiO_2) были использованы для изготовления композитов A- SiO_2 /N- TiO_2 , которые после модификации полидиметилсилоксаном были распылены на поверхности подложек из стекла, дерева, пенопласта, бетона и кирпича. Выявлено, что под воздействием фотокатализа наблюдается разложение красителя (раствор метилового оранжевого) на сформированных покрытиях.

Более того, покрытие сохраняет самоочищающиеся свойства после пребывания на открытом воздухе в течение 3 месяцев, что свидетельствует о хорошей адаптивности к условиям внешней среды.

В [13] были изучены самоочищающиеся свойства различных облицовочных материалов, покрытых золь-гелевыми продуктами на основе диоксида титана. Для оценки характеристик самоочищающихся покрытий использовались как лабораторные экспериментальные методы, так и натурные исследования. В рамках этой работы были выявлены различия в полученных результатах между северным и южным фасадами, что объясняется наличием прямого облучения в последнем случае, которое, вероятно, увеличивает скорость фотокаталитической реакции и, следовательно, облегчает самопроизвольную очистку во время дождя.

Помимо диоксида титана в качестве фотокатализаторов могут выступать различные полупроводниковые соединения: халькогениды, галогениды, различные природные материалы, другие оксиды [5, 14]. Например, в работе [15] предлагается использовать оксид висмута (Bi_2O_3) в его кристаллических формах: моноклинной (α) и тетрагональной (β), а также гетероструктур $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ в качестве фотокатализаторов для покрытий и растворов. В качестве базового материала для этих покрытий использовалась щелочно-активированная летучая зола, которая является отходом промышленности. Было доказано, что полученные покрытия обладают фотоактивными и антибактериальными свойствами, а также способны обеззараживать воздух.

Таким образом, урбанизация, как мировая тенденция, приводит к повышению требований к уровню строительных конструкций и материалов. Теперь недостаточно возвести здание большой этажности или большой протяженности с выразительным архитектурным фасадом. Здание должно быть экологичным и экономически эффективным на стадии эксплуатации. Поэтому все более широкое применение приобретают multifunctionальные покрытия, способные к самоочищению, или обладающие гидрофобными и обеззараживающими свойствами. Работы, приведенные в данной статье, показывают целесообразность научных изысканий в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. – 685 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2017. – 760 с.

3. Умнякова Н. П. Влияние загрязнений воздушной среды городов на конструкции вентилируемых фасадов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 3. – С. 221–227.
4. Умнякова Н. П. Методика определения скорости движения частиц в воздушном потоке в конструкции вентфасада // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 4–7.
5. Артемьев Ю. М., Рябчук В. К. Введение в гетерогенный фотокатализ. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та., 1999. – 304 с.
6. Фаликман В. Р. Нанопокрывтия в современном строительстве // Нанотехнологии в строительстве. – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 5–11.
7. Хела Р., Боднарлова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа TiO_2 в бетоне // Строительные материалы. – 2015. – № 2. – С. 77–81.
8. Горбачев С. А., Осовская И. И. Диоксид титана. Повышение его фотокаталитической активности. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 24 с.
9. Лукутцова Н. П., Постникова О. А., Соболева Г. Н., Ротарь Д. В., Оглоблина Е. В. Фотокаталитическое покрытие на основе добавки нанодисперсного диоксида титана // Строительные материалы. – 2015. – № 11. – С. 5–8.
10. Chudakova O. A., Lukutcova N. P., Hotchenkov P. V. Nanoparticles of titanium dioxide in the conditions of various stabilizers. Problems of innovative biospherecompatible social and economic development in the construction, housing and communal and road complex // Proceedings of the 2-nd International Scientific and Practical Conference. – Brjansk: BGITA, 2010. – Vol. 1. – Pp. 273–278.
11. Лабузова М. В., Губарева Е. Н., Огурцова Ю. Н., Строкова В. В. Использование фотокаталитического композиционного материала в цементной системе // Строительные материалы. – 2019. – № 5. – С. 16–21.
12. Xuan Wang, Weihua Ao, Sijia Sun, Han Zhang, Run Zhou, Yangzi Li, Jie Wang, Hao Ding Tunable Adhesive Self-Cleaning Coating with Superhydrophobicity and Photocatalytic Activity [Электронный ресурс] // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11. – Is. 6. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/nano11061486> (дата обращения 07.03.2023).
13. Andaloroa A., Mazzucchellia E. S., Lucchinia A., Pedeferrib M. P. Photocatalytic self-cleaning coatings for building facade maintenance. Performance analysis through a case-study application // Journal of Facade Design and Engineering. – 2016. – No. 4. – Pp. 115–129.
14. Спирин И. П., Низин Д. Р., Низина Т. А., Орлова Я. А. Перспективы использования самоочищающихся фотокаталитических покрытий для защиты строительных конструкций зданий и сооружений // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: материалы XVII Международной научно-технической конференции молодых ученых, посвященной памяти профессора В. И. Калашникова

(26-28.10.2022). – Пенза, 2022. – С. 91–95.

15. Mercedes Sharon Vega Mendoza Desarrollo de recubrimientos fotoactivos fabricados a partir de heteroestructuras α - β - $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Bi}_2\text{O}_2\text{CO}_3$ y materiales cementantes alternativos: Maestría thesis [Электронный ресурс]. – Universidad Autónoma de Nuevo León, 2020. – 112 p. – Режим доступа: <http://eprints.uanl.mx/21990/>(дата обращения 07.03.2023).

БЕРЕЗЕНЦЕВА А. А., НИЗИНА Т. А., МИТРОШИН И. А.

ИНТЕГРАЦИЯ AUTODESK REVIT 2022 С ПК ЛИРА 10.12

Аннотация. Выполнено формирование информационной модели многоэтажного жилого дома с каркасной конструктивной системой в Autodesk Revit 2022. Определена технологическая последовательность создания модели. Получена аналитическая модель. Произведен экспорт в ПК ЛИРА 10.12. Представлены результаты экспорта модели.

Ключевые слова: информационная модель здания, многоэтажный жилой дом, каркасная система, система автоматизированного проектирования, Autodesk Revit, аналитическая модель, экспорт, ПК ЛИРА 10.12.

BEREZENTSEVA A. A., NIZINA T. A., MITROSHIN I. A.

INTEGRATION OF AUTODESK REVIT 2022 WITH SP LIRA 10.12

Abstract. The formation of an information model of a multistory residential building with a frame structural system in Autodesk Revit 2022 was carried out. The technological sequence for creating the model was determined. An analytical model is obtained. Exported to SP LIRA 10.12. The results of the model exporting are presented.

Keywords: building information model, multistory residential building, frame system, computer-aided design system, Autodesk Revit, analytical model, export, SP LIRA 10.12.

Autodesk Revit – полнофункциональная САПР от компании Autodesk, предоставляющая возможности архитектурного проектирования, проектирования инженерных систем и строительных конструкций, а также моделирования процессов строительства [1]. Данная информационная система обеспечивает высокий уровень совместной работы специалистов различных специальностей, позволяя значительно сократить число возможных ошибок [2]. При этом важным вопросом является корректный экспорт аналитической модели в расчетные программные комплексы без потери части информации.

Проведем анализ различных подходов к экспорту аналитической модели из Autodesk Revit в ПК ЛИРА 10.12, в частности, с помощью формата IFC 2x3 и встроенного плагина в Revit [3; 4]. Для этого первоначально спроектируем объект исследования и проанализируем реализацию аналитической модели в Revit. Выбор конструктивного решения пространственного каркаса многоэтажного здания предполагает такие исходные параметры как: вертикальные несущие элементы: колонны, пилоны; перекрытие: монолитное безбалочное. Размеры здания в плане $27,85 \times 18,6$ м; высота типового этажа – 3,0 м; количество этажей – 12; отметка пола первого этажа – (-0,600).

На первом этапе запроектируем диафрагмы жесткости каркаса, обеспечивающие пространственную жесткость. Для этого воспользуемся инструментом *Стена* и *Колонна* из группы модулей *Конструирование*. Так как данные элементы являются несущими, необходимо присвоить им необходимые параметры для того, чтобы программа воспринимала эти элементы как объекты аналитической модели. Первоначально выберем инструмент *Стена: несущая* и создадим типоразмер для пилонов. Для этого создадим свойство типа *Диафрагма – 200 мм* и зададим необходимую структуру материалов, назначив его несущим слоем.

Важно учитывать, что Revit при создании стен имеет свою классификацию функций слоев [5]:

- Структура (1) – несущий слой конструкции;
- Основа (2) – вспомогательный слой (основание для крепления);
- Термическая/воздушная прослойка (3) – слой утеплителя;
- Отделка 1 (4) – наружная сторона отделки;
- Отделка 2 (5) – внутренняя сторона отделки;
- Изолирующее покрытие – мембрана.

Проектирование стен, как правило, производится на плане. Высота стен определяется уровнем нижней и верхней плоскости, который задается для каждого уровня. Внутренние и наружные стены создаются аналогичным образом.

Далее запроектируем несущие колонны с помощью кнопки *Несущая колонна*. Так как программой не предусмотрены необходимые для данного проекта колонны, подгрузим их из библиотеки Revit, создав необходимые типоразмеры семейства, в частности: 300×600, 600×300, 600×400, 400×600, 400×800 и 400×400 мм.

Следующим этапом проведем заполнения оконных и дверных проемов. Заполнение проемов производится аналогично созданию колонн и стен – с помощью создания семейств. Витражи задаются как самостоятельные плоскости с помощью свойства *Витраж* кнопки *Стена*.

Лестничные марши, а также лестницы, пандусы и ограждения входной группы задаются с помощью специальных кнопок на вкладке *Архитектура* путем создания семейств с необходимыми типоразмерами.

Карниз создадим на 3D-виде с помощью кнопки *Стена: выступающий профиль*, создав при этом семейства с необходимыми профилями.

Перекрытие на уровне пола первого и второго этажа зададим при помощи инструмента *Перекрытие: несущее*. Проемы шахты лифта и лестничной площадки создадим при помощи

кнопки *Шахта*; таким образом появится возможность отрегулировать верхний и нижний диапазоны.

Планировка первого и второго этажа проектируемого здания отличаются, однако наружные стены и каркас остаются неизменными, поэтому для упрощения процесса проектирования скопируем первый этаж с помощью кнопки *Копировать в буфер* и вставим его на уровень второго этажа с помощью кнопки *Вставить с выравниванием по выбранным уровням*. Далее отредактируем планировку с помощью известных инструментов.

Оставшиеся этажи многоэтажного жилого дома возводятся аналогичным образом с помощью доступных инструментов Revit. План первого этажа представлен на рисунке 1, план типового этажа – на рисунке 2, 3D-модель здания – на рисунке 3.

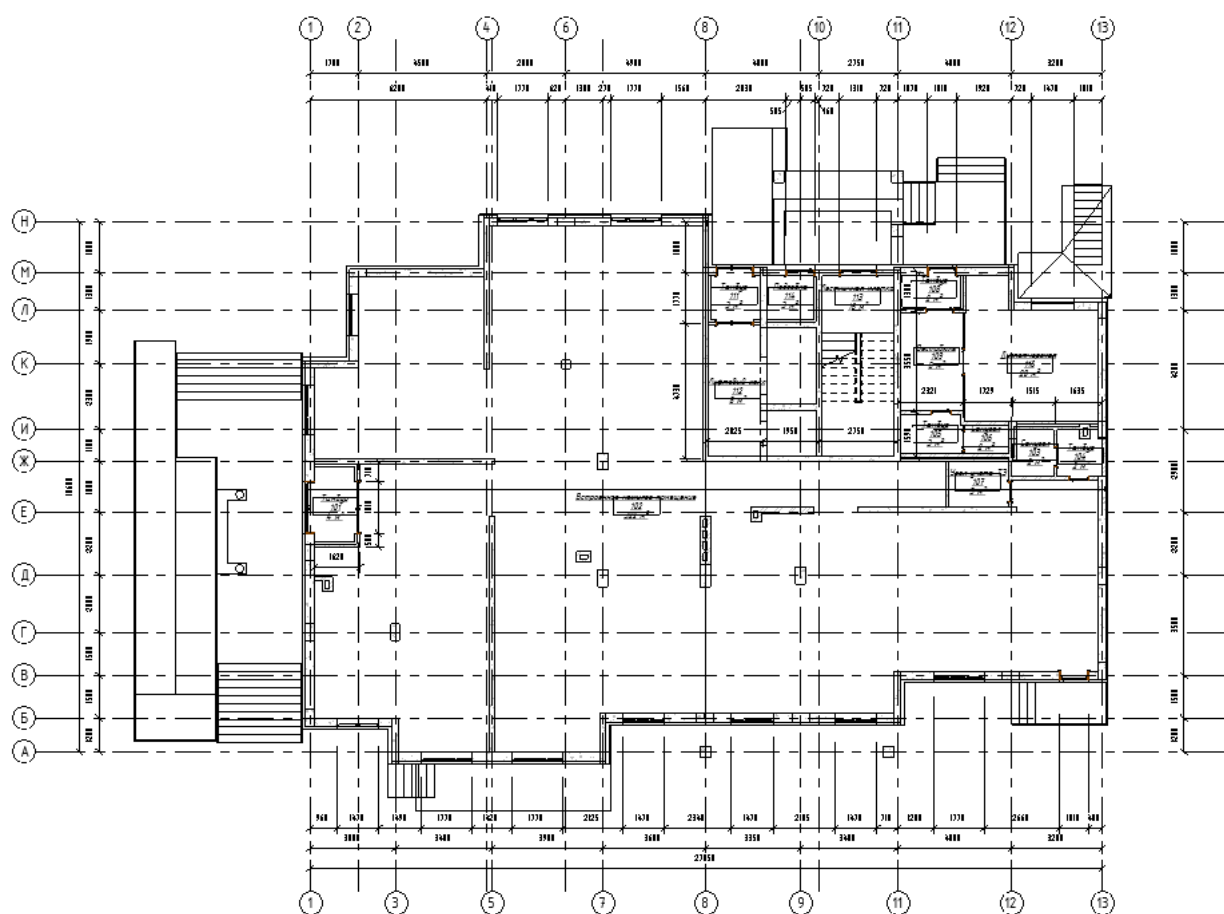


Рис. 1. План 1-го этажа.

Перед получением аналитической модели отобразим модель несущих конструкций смоделированного здания с помощью смены раздела вкладки *Дисциплина* на панели свойств с *архитектурного* на *конструкторский* (рисунок 4).

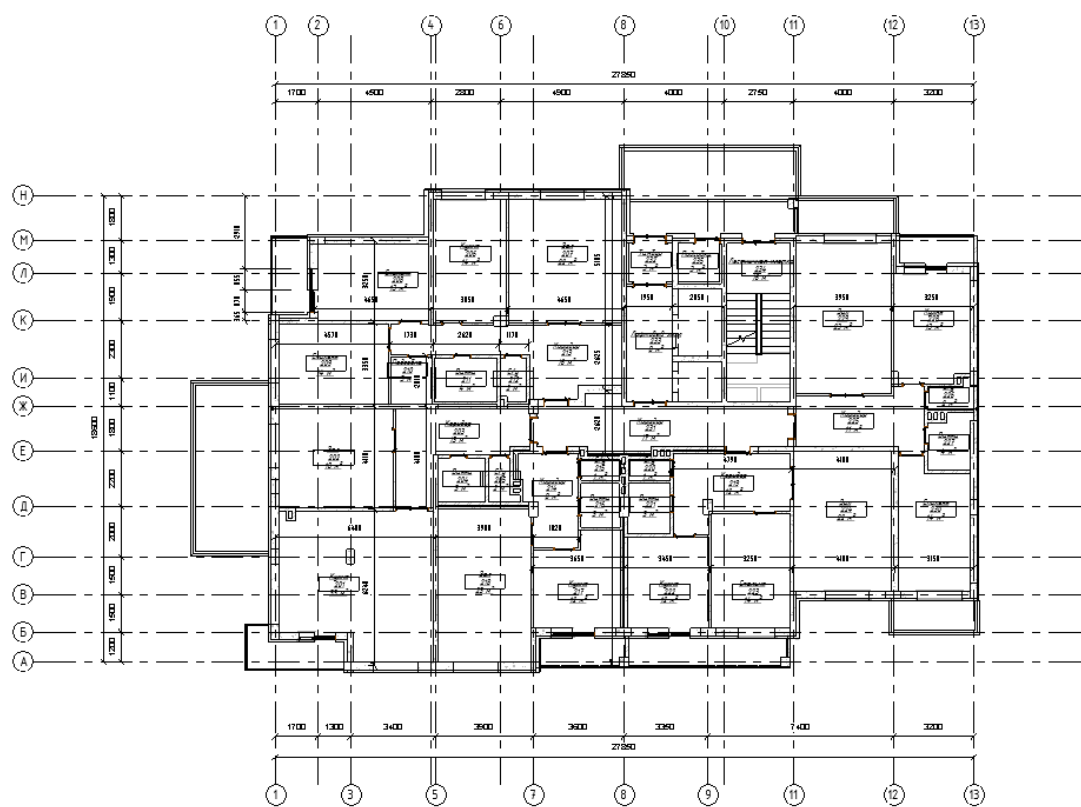


Рис. 2. План типового этажа.



Рис. 3. 3D-модель здания.

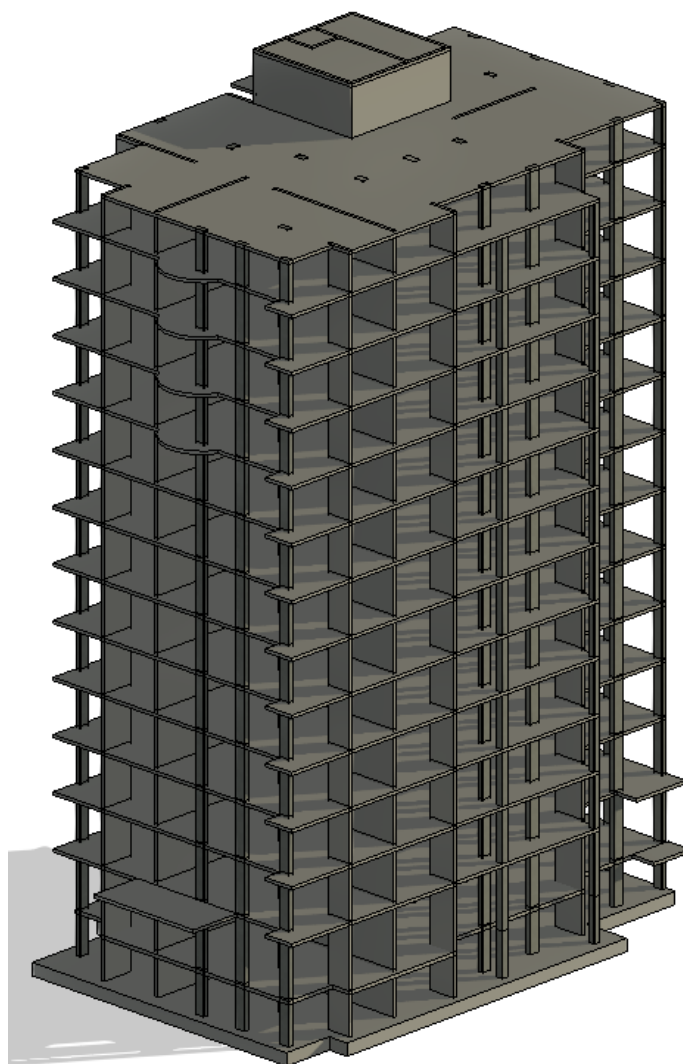


Рис. 4. 3D-модель несущих конструкций.

В Autodesk Revit обмен информации с программами, реализующими метод конечных элементов (МКЭ) [5; 6], для расчета и анализа несущих конструкций возможен посредством аналитической модели, которая представляет собой упрощенное трехмерное представление физической модели несущих конструкций. Так, в аналитическом представлении перекрытия и фундаментные плиты приводятся к пластинам, а балки и колонны – к стержням. Также аналитическая модель содержит в себе информацию о поперечных сечениях и толщинах элементов модели, а также сведения об их геометрии, материалах, условиях закрепления и нагрузках.

В Revit аналитическая модель создается автоматически в ходе моделирования элементов несущих категорий: несущие стены, перекрытия, несущий каркас, несущие колонны, фундамент, фермы. Достаточно только активировать *Категории* аналитической модели и настроить их графику (рисунок 5) с помощью кнопки *Видимость/Графика* панели *Вид*, вкладка *Графика*. Полученная аналитическая модель представлена на рисунке 6.

Переопределения видимости/графики для: 3D вид: Аналитическая модель

Категории модели | Категории аннотаций | Категории аналитической модели | Импортированные категории | Фильтры

☒ Показать категории аналитической модели на данном виде

Если категория не отмечена, то она будет невидимой.

Фильтр по дисциплинам: Конструкция

Видимость	Проекция/Поверхность			Полутона	Уровень детализации
	Линии	Штриховки	Прозрачность		
☒ Аналитические модели балки	Переопределить...			☐	По виду
☒ Аналитические модели изолированных ф...				☐	По виду
☒ Аналитические модели колонн				☐	Средний
☒ Аналитические модели ленточных фунда...				☐	По виду
☒ Аналитические модели перекрытий			30%	☐	Средний
☒ Аналитические модели раскосов				☐	По виду
☒ Аналитические модели стен			30%	☐	Средний
☒ Аналитические модели фундаментных пл...			30%	☐	Средний
☒ Варианты нагружений на конструкцию				☐	По виду
☒ Внутренние нагрузки несущих конструкций				☐	По виду
☒ Граничные условия				☐	По виду
☒ Жесткие связи				☐	Средний
☒ Нагрузки на конструкцию				☐	По виду
☒ Узлы аналитической модели				☐	Средний

Все Ни одной Обратить Развернуть все

Непереопределенные категории отображаются в соответствии со стилями объектов. Стили объектов...

OK Отмена Применить Справка

Рис. 5. Настройка параметров аналитической модели.

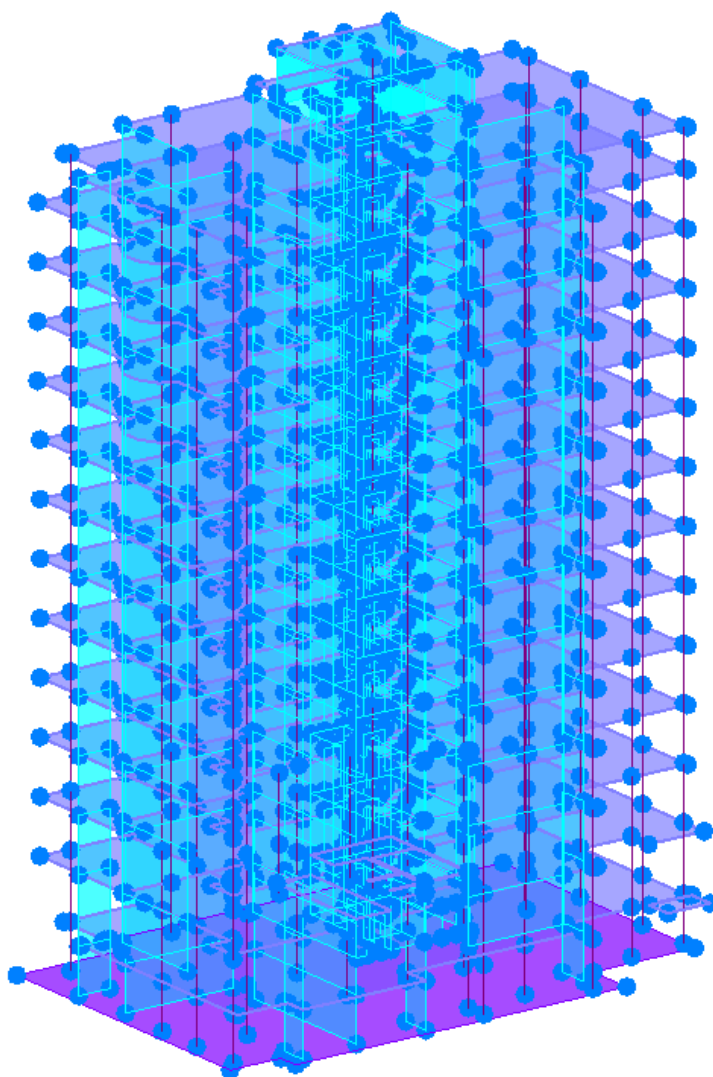


Рис. 6. Аналитическая модель здания.

После получения аналитической модели экспортируем ее в расчетный комплекс ПК ЛИРА 10.12, представляющий собой многофункциональный программный комплекс для проектирования и расчёта строительных и машиностроительных конструкций различного назначения.

Интеграцию Revit с ЛИРА 10 возможно осуществить двумя способами:

- с помощью встроенного плагина экспорта на панели *Настройки* в окне *Инструменты ЛИРА 10*;
- с помощью передачи в формат IFC 2x3 Coordination View 2.0.

Сначала рассмотрим второй способ. Для этого активируем аналитическую модель, а после проверки корректности отображения элементов, передадим ее в IFC 2x3 [6]. В Revit есть возможность применить определенные настройки: в первую очередь это выбор версии транслятора. Он поддерживает несколько вариантов IFC2x3, а также IFC4. Далее откроем ЛИРА 10.12 и импортируем модель (рисунок 7).

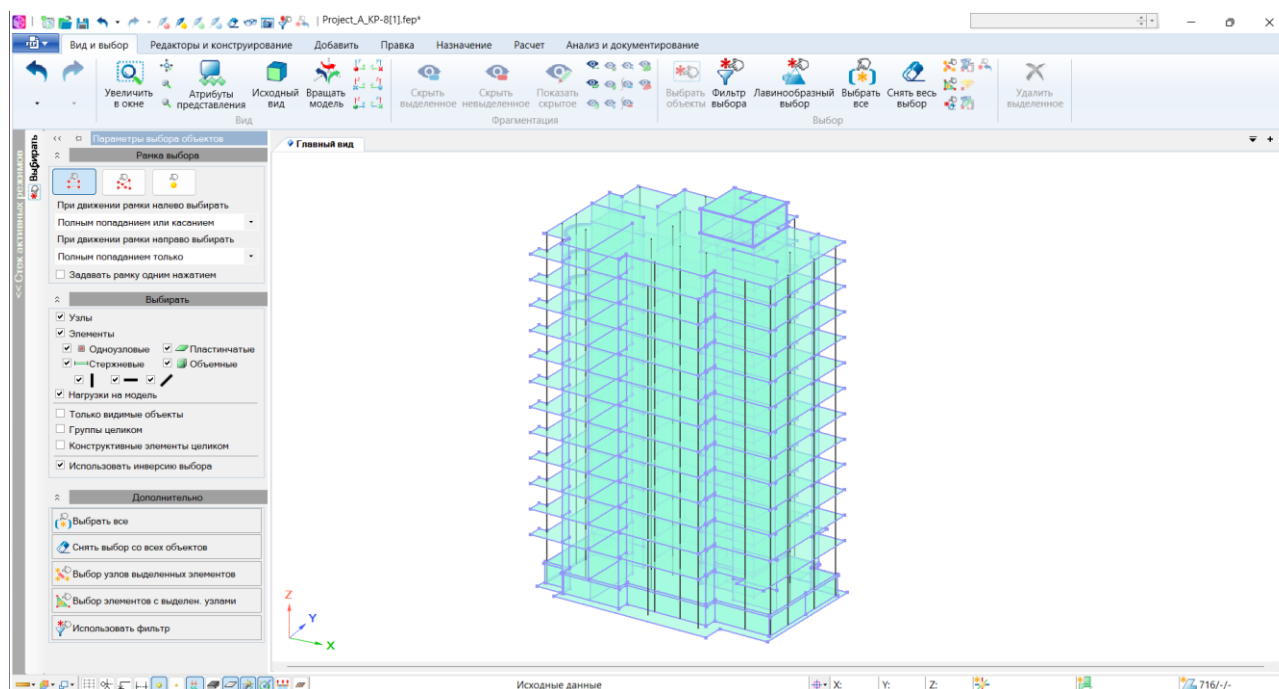


Рис. 7. Интеграция Блока А из Revit в ЛИРА 10 с помощью IFC2x3.

Проанализируем полученную модель и отметим, что импорт через формат IFC произошел не совсем корректно (рисунок 8): граница стен и колонн превышает над уровнем плиты, узлы не стыкуются друг с другом, в некоторых местах заметен обрыв колонн.

Воспользуемся возможностью импорта модели здания в ЛИРА 10 из Revit с помощью встроенного плагина. При нажатии на кнопку *Экспорт модели Revit* программа выведет

на экран окно *Мастер экспорта*, которое позволяет произвести ряд настроек модели, включая назначения триангуляции (рисунок 9).

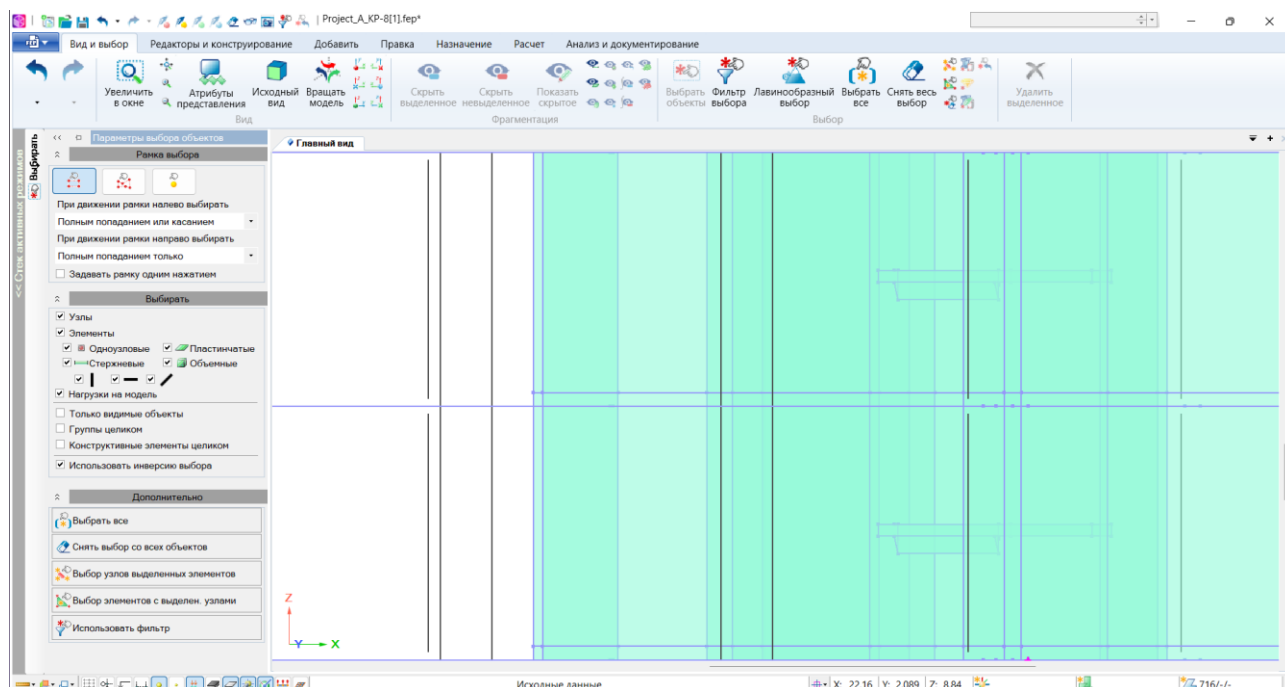


Рис. 8. Погрешности экспорта модели из Revit в ЛИРА 10 с помощью IFC2x3.

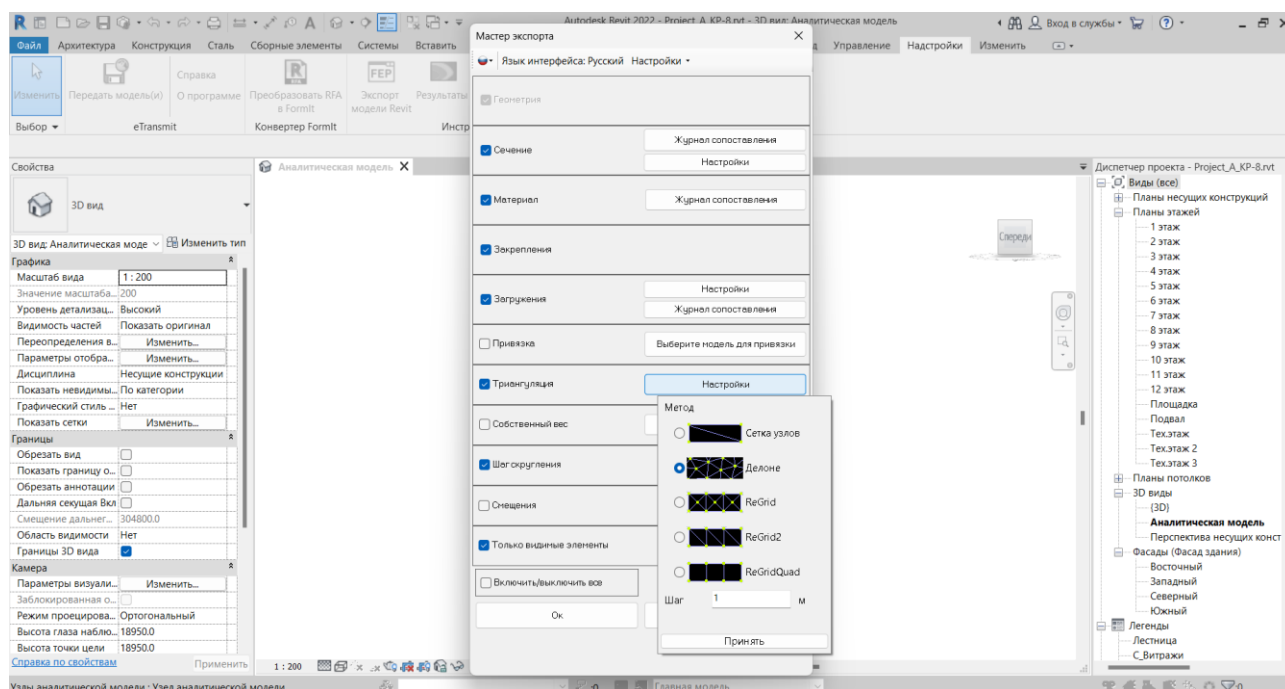


Рис. 9. Аналитическая модель в Revit.

Выполнив необходимые настройки, программа начнет экспорт в расчетный комплекс и по завершению откроет модель в ЛИРА 10 (рисунок 10). Отметим, что в данном случае модель импортировалась корректно (рисунок 11).

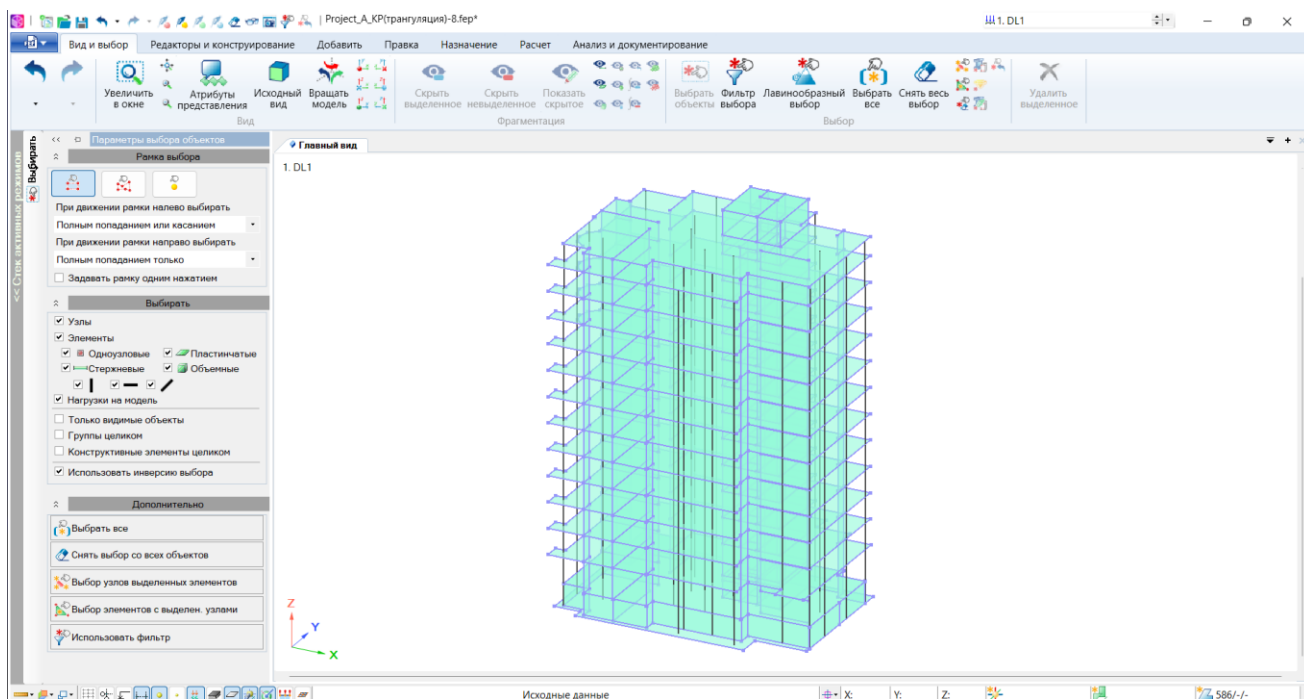


Рис. 10. Интеграция Блока А из Revit в ЛИРА 10 с помощью встроенного плагина.

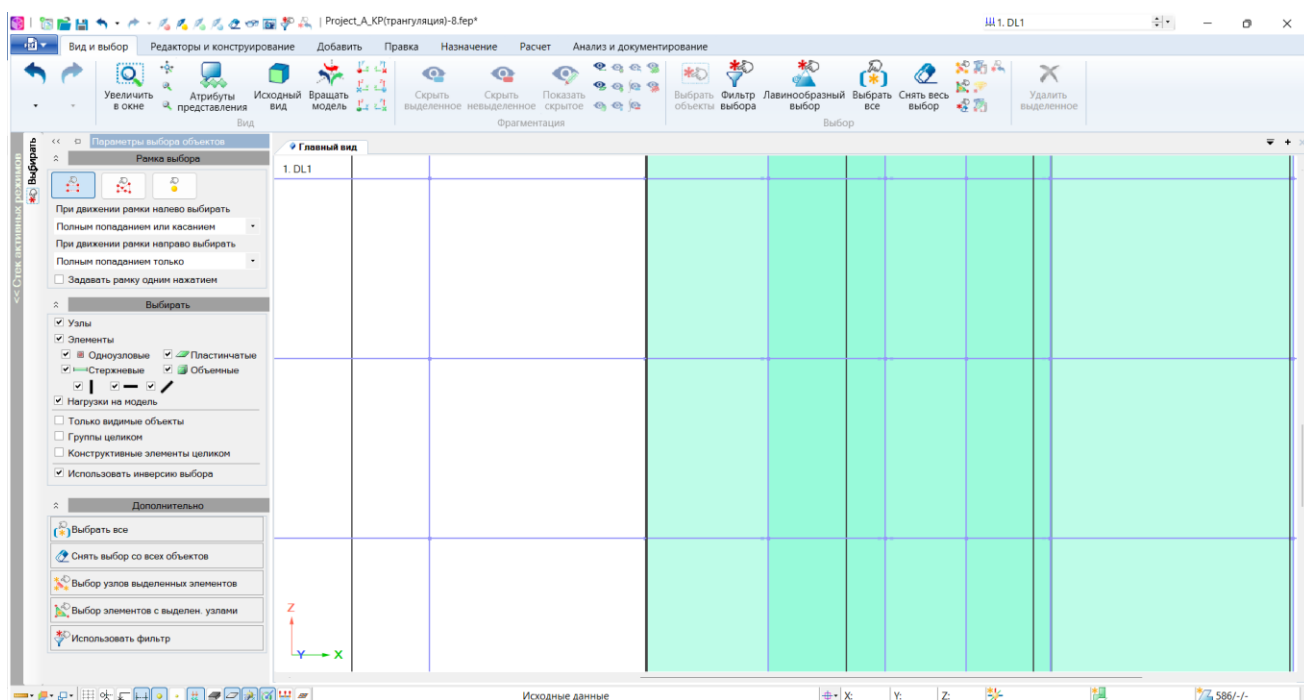


Рис. 11. Интеграция Блока А из Revit в ЛИРА 10 с помощью встроенного плагина.

Вывод. По результатам проведенного анализа выявлено, модель Revit не только передается в ПК ЛИРА 10, а синхронизируется с ней, становясь частью сквозного проектирования. При этом необходимо отметить, что корректный экспорт для данного объекта был реализован в случае связи Revit с ЛИРА 10 через специальный плагин; в случае передачи модели в расчетный комплекс по средству формата IFC произошла потеря части данных. При интеграции Revit 2022 с ПК ЛИРА 10.12 вся работа происходит в одной модели

без прерывания процесса проектирования. В случае внесения изменений в проект (добавление нагрузок, смещение проемов, изменение несущих конструкций) обновление расчётной модели производится в один клик, что говорит о правильной интеграции двух разнонаправленных пакетных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов В. В. Основы BIM: Введение в информационное моделирование зданий. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 392 с.
2. Младзиевский Е. П. Применение программных надстроек в Revit как способ расширения стандартного функционала // ACADEMY. – 2020. – № 2. – С. 9–10.
3. Совместная работа ЛИРА 10 и Autodesk Revit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lira-soft.com/learning/lira-10-revit-videocourse> (дата обращения 12.04.2023).
4. ПК ЛИРА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://support.ascon.ru/source/info_materials/2016/2016-booklet-LIRA-10.4.pdf (дата обращения 12.04.2023).
5. Autodesk Revit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/revit> (дата обращения 12.04.2023).
6. Сельдюшов А. А., Низина Т. А., Ошкина О. М. Анализ совместной работы Autodesk Revit и ПК Лира 10.10 [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2021. – № 6. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/analiz-sovmestnoj-raboty-autodesk-revit-i-pk-lira-10-10> (дата обращения 12.04.2023).

НИЗИН Д. Р., НИЗИНА Т. А., СПИРИН И. П., НАРМАНИЯ Б. Е., СИГАЧЕВ А. Ф.

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ
СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ¹**

Аннотация. Изучено влияние влажностного состояния на упруго-прочностные показатели и кинетику накопления повреждений в структуре образцов эпоксидного полимера на основе смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45TZ₂. На основе авторской методики, позволяющей определять положение критических точек на кривых деформирования полимерных материалов с помощью методов фрактального анализа, количественно описан процесс накопления повреждений. Установлено, что повышение влагосодержания полимерного материала позволяет достичь под действием растягивающих нагрузок формирования ярко выраженного этапа вынужденных высокоэластических деформаций. Выявлено снижение предела прочности при растяжении и повышение относительного удлинения при разрыве для влагонасыщенных образцов по сравнению с полимером в равновесно-влажностном состоянии, соответственно, в 5,3 и 5,4 раз. Установлено, что при предельном влагонасыщении происходит ускорение скорости накопления отказов с повышением уровня прикладываемого напряжения при растяжении по сравнению с образцами в равновесно-влажностном состоянии в 4,3-5,5 раз.

Ключевые слова: полимерные материалы, эпоксидные полимеры, кривые деформирования, фрактальный анализ, накопление повреждений.

NIZIN D. R., NIZINA T. A., SPIRIN I. P., NARMANIA B. E., SIGACHEV A. F.

**INFLUENCE OF HUMIDITY STATE ON CHANGES
IN THE PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS**

Abstract. The paper studies the influence of the moisture state on the elastic-strength parameters and kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymer samples based on Etal-247 resin and Etal-45TZ₂ hardener. Damage accumulation process is quantitatively described based on the author's technique determining the position of critical points on deformation curves of polymer materials using fractal analysis methods. has been established that an increase in the moisture content of a polymer material makes it possible to achieve, under tensile loads, formation of a pronounced stage of forced highly elastic deformations. We have revealed a decrease in the ultimate tensile strength and an increase in the relative elongation at break for moisture-saturated specimens compared to the polymer in the equilibrium-moisture state, by 5,3 and 5,4 times, respectively. It was

¹ Работа выполнена в рамках реализации Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя России на 2021 год (№3.1.7.1 «Исследование механизмов формирования обратимых и необратимых изменений свойств полимерных материалов в процессе натурного климатического старения»).

found that at the ultimate moisture saturation, the rate of failure accumulation accelerates with an increase in the level of applied stress at strain compared to the samples in the equilibrium-moisture state, by 4,3-5,5 times.

Keywords: polymer materials, epoxy polymers, the curves of deformation, fractal analysis, damage accumulation.

В настоящее время все более актуальной становится задача обеспечения надежной эксплуатации строительных материалов, изделий и конструкций, подверженных натурному климатическому воздействию. Наряду с температурой и интенсивностью актинометрических факторов, наиболее значимыми климатическими факторами, оказывающими влияние на свойства полимерных строительных композитов в процессе эксплуатации, являются влажность и атмосферные осадки [1–5]. Сорбируемая полимерными композитами влага активирует процессы структурной релаксации, оказывает частично обратимое пластифицирующее воздействие, а также участвует в реакциях гидролиза и доотверждения [6].

В исследованиях [7–11] показано, что влагопоглощение полимерных материалов и связанная с ним потеря прочности определяются структурой и типом полимерной матрицы, составом связующего, степенью отверждения, толщиной и пористостью образцов, а также состоянием межфазного слоя на границе раздела матрица/наполнитель. Следствием химического взаимодействия влаги с полимерными композитами является гидролиз макромолекул и последующие реакции деструкции материала [9]. Однако действие влаги проявляется не только в химическом взаимодействии. Вода заполняет собой различные микродефекты, вызывая микрорастрескивание матрицы в местах концентрации остаточных напряжений. Кроме того, поглощённая полимерной матрицей влага может выступать в качестве пластификатора, ослабляя абсорбционные взаимодействия между макромолекулами (или их звеньями) полимера и силу адсорбционного взаимодействия на границе раздела фаз [12–15]. Проникая между молекулами полимерной матрицы, вода приводит к релаксации внутренних напряжений, увеличению подвижности макромолекул и снижению уровня поперечной сшивки.

В естественных климатических условиях эксплуатации предельное влагонасыщение полимерного материала практически не достигается вследствие относительно низкой скорости сорбции влаги и конкурирующего процесса десорбции за счёт нагрева и охлаждения поверхности, изменения влажности и атмосферного давления окружающей среды и т.д. Однако необходимость учета влияния влагосодержания полимеров, в том числе в их предельных равновесно-влажностных состояниях (высушенном и влагонасыщенном), крайне

важна для понимания работы полимеров в натуральных климатических условиях. Дополнительный интерес представляет количественная оценка кинетики накопления повреждений в структуре образцов полимерных материалов под действием механических нагрузок.

Объектами исследования являлись образцы эпоксидного полимера на основе смолы марки Этал-247 и отвердителя марки Этал-45TZ₂ производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ». Эпоксидная смола Этал-247 (ТУ 2257-247-18826195-07) представляет собой низковязкую модифицированную смолу с вязкостью по Брукфильду при 25 °С 650÷750 СПз. Массовая доля эпоксидных групп для Этал-247 составляет не менее 21,4÷22,8 %. Согласно информации от производителя, отвердитель Этал-45TZ₂ предназначен для отверждения эпоксидных смол и компаундов на их основе при температуре от -7 до +45°С при любой влажности и под водой. Использование отвердителя Этал-45TZ₂ обеспечивает высокую адгезию и может использоваться в составе клеев и антикоррозионных составов для металла и бетона. Данный отвердитель рекомендован к применению при изготовлении клеев и компаундов, устойчивых к перепадам температур от -4 до +60 °С, стойких к воздействию воды, кислот и щелочей.

Механические испытания образцов исследуемых составов на растяжение проводились с помощью разрывной машины серии AGS–X с программным обеспечением TRAPEZIUM X. Испытания проводились при температуре 23±2 °С и относительной влажности воздуха 50±5%. Скорость перемещения зажимов испытательной разрывной машины составляла 2 мм/мин, база испытания (расстояние между зажимами) – 115 мм. Частота фиксации показаний составляла 0,01 сек. Параллельно для каждого состава испытывалось не менее 10 образцов (тип 2 согласно ГОСТ 11262-2017). Прочностные и деформативные характеристики образцов исследуемого полимера определяли в трех различных влажностных состояниях – равновесно-влажностном, высушенном и влагонасыщенном. Сушка образцов осуществлялась при температуре 60°С, увлажнение – в эксикаторах над водой до установления постоянных значений по массе согласно ГОСТ Р 56762-2015 «Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния».

В работе проведена оценка влияния влажностного состояния эпоксидного полимера на изменение его прочностных и деформативных характеристик, а также кинетики накопления повреждений в структуре образцов под действием растягивающих нагрузок. Определение количественных значений накопленных повреждений выполнено на основе авторской методики, позволяющей определять координаты критических точек кривых деформирования, выявляемых с помощью методов фрактального анализа [16–19]. Предложенная методика заключается в определении координат «критических» точек кривых деформирования, для которых значения индексов фрактальности, рассчитываемых по предшествующим малым

временным интервалам с помощью метода наименьшего покрытия, составляют менее 0,5. Исследовались временные интервалы продолжительностью 0,16 секунд со смещением анализируемой области с шагом 0,01 сек.

Для оценки уровня накопленных отказов, приводящих к разрушению образцов под действием растягивающих нагрузок, использовался показатель, определяемый как отношение числа точек с индексом фрактальности, меньшим 0,5, к общему числу точек кривых деформирования (до достижения максимальных уровней растягивающих напряжений) [18; 20]. Расчет значений индексов фрактальности в зависимости от уровня создаваемого напряжения и относительной деформации позволяет оценить кинетику накопления повреждений при приложении к образцу растягивающей нагрузки:

$$\omega(\sigma, \varepsilon) = \frac{m_{\mu(\sigma, \varepsilon)}}{n_{\mu(\sigma, \varepsilon)}} 100\%, \quad (1)$$

где $m_{\mu(\sigma, \varepsilon)}$ – число точек исследуемого ряда, для которых выполняется условие $\mu(\sigma, \varepsilon) < 0,5$; $n_{\mu(\sigma, \varepsilon)}$ – общее число анализируемых точек кривых деформирования.

Анализ полученных результатов показал, что кривые деформирования образцов в равновесно-влажностном и высушенном состояниях имеют как восходящую, так и нисходящую ветви, что позволяет определить прочностные и деформативные характеристики эпоксидного полимера при растяжении и разрыве (рис. 1). Средние арифметические показатели предела прочности при растяжении и относительного удлинения при максимальной нагрузке серии образцов в равновесно-влажностном состоянии, соответственно, равны 53,5 МПа и 3,63%, в высушенном – 48,2 МПа и 3,54%; предел прочности и относительное удлинение при разрыве в равновесно-влажностном состоянии – 47,1 МПа и 3,97%, в высушенном – 36,7 МПа и 5,70%.

Влагонасыщение образцов контрольных составов до установления в них равновесного состояния приводит к существенному снижению прочностных показателей и повышению относительного удлинения при разрыве (рис. 1). Вид кривых деформирования влагонасыщенных образцов представляет собой возрастающие кривые с двумя разными участками наклона, что вызывает определенные сложности при идентификации уровня предела прочности при растяжении. Для его определения производилась оценка изменения прироста напряжений при растяжении, фиксируемого с частотой снятия показаний через 0,01 сек., в зависимости от уровня относительного удлинения (рис. 2). Установлено, что при определенном уровне растягивающих деформаций прирост напряжений стремится к нулевым значениям, что проявляется как для образцов во влагонасыщенном (рис. 2, а), так и в высушенном (рис. 2, б) и равновесно-влажностном состояниях. Именно этот уровень относительных деформаций, выделенный на рисунке 2 красной вертикальной линией, был

принят при дальнейшем анализе как соответствующий достижению образцами «критических» напряжений, идентифицируемых как предельное напряжение при растяжении.

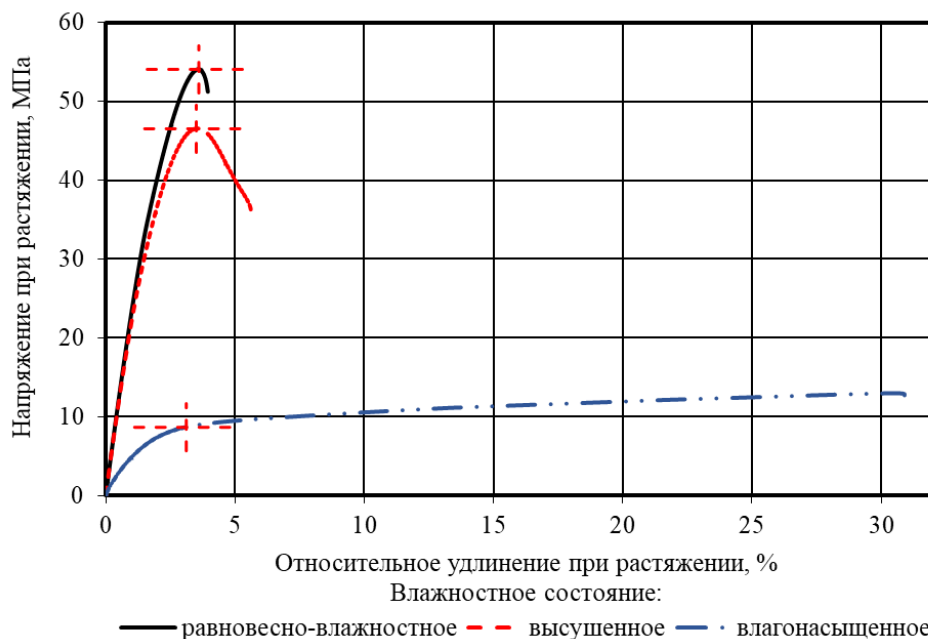


Рис. 1. Кривые деформирования образцов эпоксидных полимеров состава Этал-247/Этал-45TZ₂ при растяжении в различных влажностных состояниях: равновесно-влажностном, высушенном и влагонасыщенном (красными штриховыми линиями обозначены уровни предела прочности при растяжении и соответствующих им относительных удлинений).

На рисунке 1 данные «критические» уровни напряжений при растяжении полимерных образцов и соответствующих им относительных удлинений обозначены пересекающимися штриховыми линиями красного цвета. Средние показатели исследуемых характеристик после статистической обработки серий образцов в различном влажностном состоянии представлены в табл. 1. Средняя влажность образцов в равновесно-влажностном состоянии составляла 1,41%, во влагонасыщенном – 4,92% по массе.

По результатам проведенных исследований выявлено (табл. 1), что изменение влажности образцов с 1,41 до 4,92% приводит к снижению предела прочности при растяжении с 53,5 до 8,9 МПа, что соответствует остаточной прочности всего 16,7% от контрольных значений. При этом деформативные характеристики влагонасыщенных образцов при разрыве повышаются в 7,5 раз, достигая относительных удлинений 29,9%. Столь значительные изменения упруго-прочностных показателей связаны с изменением характера поведения влагонасыщенных образцов под нагрузкой со стеклообразного на высокоэластическое.

**Упруго-прочностные и сорбционные характеристики эпоксидного полимера
Этал-247/Этал-45TZ₂ в различных влажностных состояниях**

Влажностное состояние образцов при проведении испытаний	Средние показатели исследуемых характеристик серий образцов				
	Влажность образцов, % по массе	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %	Предел прочности при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
равновесно-влажностное	1,41	53,5	3,63	47,1	3,97
высушенное	0	48,2 (-9,9%)	3,54 (-2,5%)	36,7 (-22,1%)	5,70 (+43,5%)
влажгонасыщенное	4,92	8,9 (-83,3%)	3,18 (-12,3%)	12,7 (-73,1%)	29,9 (+653,6%)

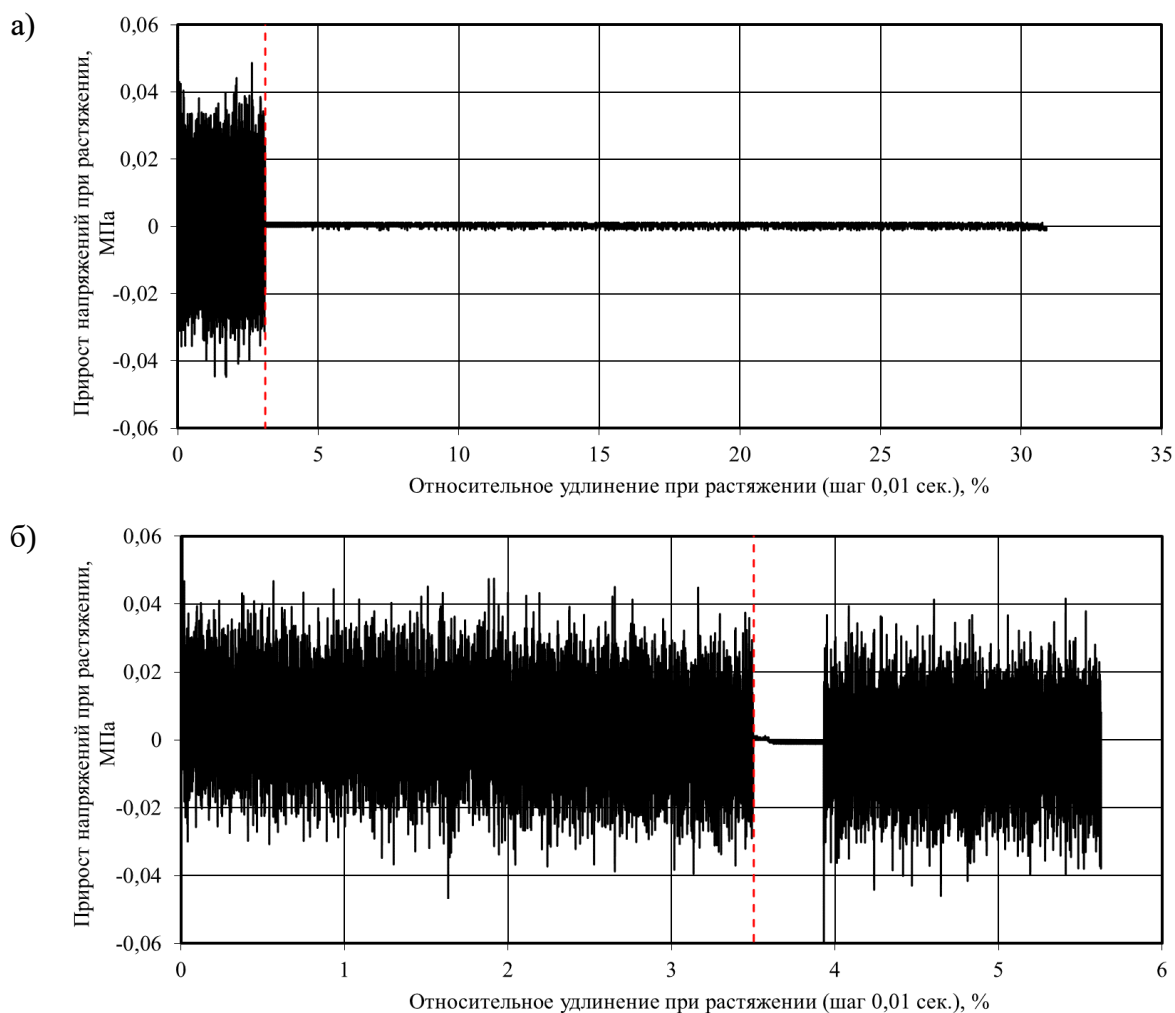


Рис. 2. Изменение прироста напряжений (шаг фиксации показаний 0,01 сек.) в зависимости от относительного удлинения при растяжении образцов эпоксидного полимера во влагонасыщенном (а) и высушенном (б) состояниях (красной штриховой вертикальной линией обозначен уровень относительного удлинения, соответствующий «критическому» напряжению при растяжении).

Удаление свободной влаги приводит к снижению прочностных показателей эпоксидного полимера Этал-247/Этал-45TZ₂ на 9,9% при практически неизменности деформативных характеристик при растяжении (-2,5%). При этом очевидно предположить, что диффузия влаги в полимер в данном случае сопровождается уменьшением сил межмолекулярного взаимодействия, что до определенного уровня может оказаться «полезным» с точки зрения прочностных характеристик. Однако дальнейшее повышение влагосодержания может оказывать отрицательное воздействие на прочность полимерных материалов [20], что ярко проявилось для исследуемого состава.

Следующий этап анализа был связан с оценкой влияния влажностного состояния образцов эпоксидного полимера на кинетику накопления повреждения в их структуре под действием растягивающих напряжений (рис. 3). Данный анализ производился для кривых деформирования до достижения образцами «критических» уровней напряжений, алгоритм определения которых представлен выше. Предельные уровни числа отказов для равновесно-влажностного, высушенного и влагонасыщенного состояний составили, соответственно, 5,65, 5,37 и 5,79%.

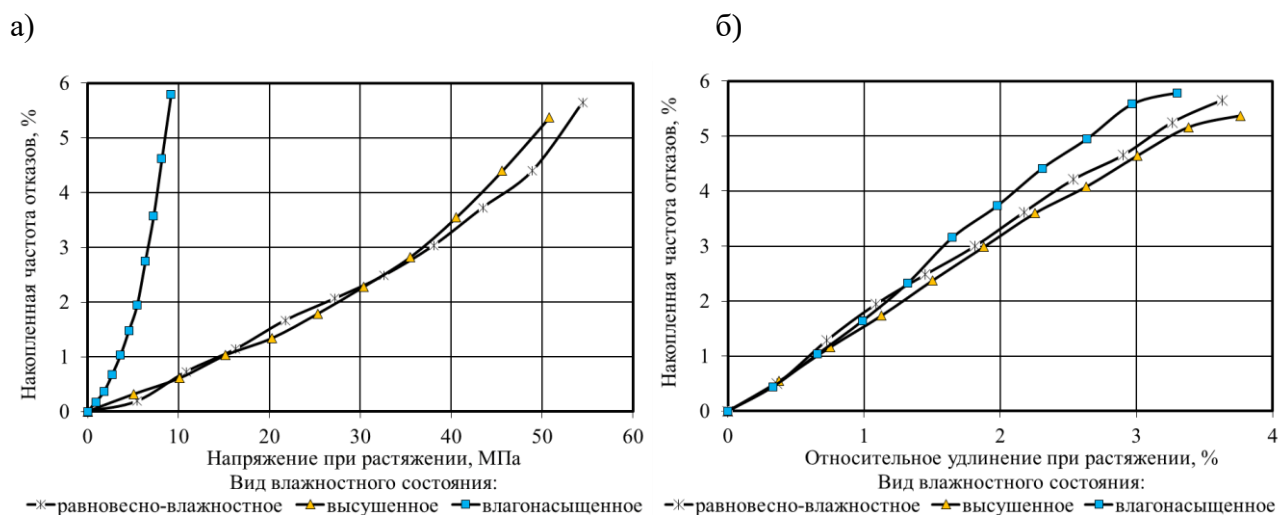


Рис. 3. Кривые накопления отказов серии образцов в различных влажностных состояниях в зависимости от уровня прикладываемых напряжений (а) и относительных удлинений при растяжении (б).

По результатам проведенного анализа установлено (рис. 3, а), что кривые накопления частоты отказов в зависимости от уровня прикладываемого напряжения для образцов, находящихся в равновесно-влажностном или высушенном состояниях, подобны. Близкий характер кривых накопления отказов зафиксирован для данных серий образцов и в зависимости от относительного удлинения при растяжении (рис. 3, б). При этом, если частота накопления повреждений для влагонасыщенных образцов лишь незначительно ускоряется с повышением уровня относительного удлинения при растяжении (рис. 3, б), то в зависимости

от уровня растягивающих напряжений происходит ускорение скорости накопления отказов по сравнению с образцами в равновесно-влажностном состоянии от 4,3 до 5,5 раз (рис. 3, а). В частности, 50% отказов от их общего числа, достижение которого приводит к разрушению образцов, достигается для влагонасыщенных образцов уже при напряжениях около 6,2 МПа. Аналогичный показатель для равновесно-влажностных и высушенных образцов достигается при уровнях растягивающих напряжений соответственно 34,0 и 31,4 МПа.

Для учета влияния предела прочности полимеров при растяжении на величину накопленных отказов используем удельный показатель θ , определяемый как [20]

$$\theta = \frac{\omega}{R_{\text{раст.}}}, \quad (2)$$

где ω – относительное число накопленных повреждений (1) при достижении образцом уровня максимальных напряжений при растяжении, %; $R_{\text{раст.}}$ – предел прочности полимерных материалов при растяжении, МПа.

Показатель θ позволяет оценить удельное число повреждений на единицу прочности, что важно при оценке уровня повреждаемости композитов. Установлено, что для влагонасыщенных образцов наблюдается повышение среднего удельного показателя θ почти в 6 раз (0,63 %/МПа) по сравнению с сериями образцов, находящихся в высушенном и равновесно-влажностном состоянии (0,11 %/МПа).

Заключение. Анализ результатов проведенных исследований показал, что содержание сорбированной влаги может существенно влиять на изменение физико-механических характеристик полимерных материалов. Повышение влагосодержания полимерного материала Этал-247/Этал-45TZ₂ до 4,92% сопровождается формированием ярко выраженного этапа вынужденных высокоэластических деформаций с повышением относительного удлинения при разрыве, снижением предела прочности при растяжении и удельным показателем θ (по сравнению с серией образцов в высушенном состоянии), соответственно, в 5,3, 5,4 и 5,9 раз. Выявлено, что при предельном влагонасыщении происходит ускорение скорости накопления отказов с повышением уровня прикладываемого напряжения при растяжении по сравнению с образцами в равновесно-влажностном состоянии в 4,3-5,5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов В. Н., Ефимов В. А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932-2007: юбил. науч.-технич. сб. – М.: ВИАМ. 2007. – С. 379–388.

2. Павлов Н. Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. – М.: Химия, 1982. – 224 с.
3. Николаев Е. В., Барботько С. Л., Андреева Н. П., Павлов М. Р., Гращенков Д. В. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной матрицы // Труды ВИАМ. – 2016. – № 6 (42). – С. 93–108.
4. Кутыинов В. Ф., Киреев В. А., Старцев О. В., Шевалдин В. Н. Влияние климатического старения на характеристики упругости и прочности полимерных композитных материалов // Ученые записки ЦАГИ. – 2006. – №4. – С. 54–64.
5. Startsev V. O., Lebedev M. P., Khrulev K. A. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // Polymer testing. – 2018. Vol. 65. – Pp. 281–296.
6. Старцев В. О., Плотников В. И., Антипов Ю. В. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // Труды ВИАМ. – 2018. – №5. – С. 110–118.
7. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – № 4 (21). – С. 41–45.
8. Maxwell A. S., Broughton W. R., Dean G., Sims G. D. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials / NPL Report DEPC MPR 016. – March 2005. – 85 p.
9. Валиев Е. О. Влияние тепловлажностного воздействия на свойства термостойких полимерных композиционных материалов на основе фталонитрильной матрицы: дисс. канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2018. – 130 с.
10. Старцев В. О., Панин С. В., Старцев О. В. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями // Механика композитных материалов. – 2015. – № 6. – С. 1081–1094.
11. Startsev V. O., Il'ichev A. V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in reinforced polymer composite samples on variation of their sizes // Mechanics of Composite Materials. – 2018. – Vol. 54. No. 2. – Pp. 145–154.

12. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 11. – С. 19–27.
13. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравномерности и градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 12. – С. 40–46.
14. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С. 34–40.
15. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Вапиров Ю. М. К вопросу о возможности прогнозирования атмосферной стойкости ПКМ // В сб. докл. VII Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидросалон-2008». – Москва, 2008. – Ч.1. – С. 307–313.
16. Nizina T. A., Nizin D. R., Kanaeva N. S. et al. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses // Key engineering materials. – 2019. – Vol. 799. – Pp. 217–223.
17. Nizina T. A., Selyaev V. P., Nizin D. R. et al. Fractal analysis of deformation curves of epoxy polymers under tension // Polymers in construction. – 2019. – Vol. 1. – Pp. 48–57.
18. Nizina T. A., Nizin D. R., Kanaeva N. S. Statistical Analysis of the Frequency of Damage Accumulation in the Structure of Epoxy Composites Under Tensile Loads // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 95. – Pp. 1-8.
19. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р., Канаева Н. С. Количественный анализ кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов при растяжении // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 2. – С. 77–89.
20. Низина Т. А., Селяев В. П., Низин Д. Р. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – 188 с.