



eISSN 2311-2468
Том 9, № 6. 2021
Vol. 9, no. 6. 2021

электронное периодическое издание
для студентов и аспирантов

Огарёв-онлайн Ogarev-online

<https://journal.mrsu.ru>



УТКИНА В. Н., ГРЯЗНОВ С. Ю., БАБУШКИНА Д. Р.
РАСЧЕТ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ
ПЕРЕКРЫТИЙ ВЫСОТНОГО ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА
С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Аннотация. В статье представлены результаты линейного и нелинейного расчетов монолитных железобетонных плит перекрытий, полученные на основе пространственной модели конструктивной системы высотного жилого комплекса. Формирование модели и общие расчеты методом конечных элементов выполнены в ПК МОНОМАХ-САПР.

Ключевые слова: высотное здание, конструктивная система, монолитные железобетонные плиты перекрытий, программный комплекс МОНОМАХ-САПР, МКЭ-расчет, физическая нелинейность, жесткостные характеристики, модуль упругости.

UTKINA V. N., GRYAZNOV S. Y., BABUSHKINA D. R.
CALCULATION OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE SLABS
OF HIGH-RISE RESIDENTIAL COMPLEX
TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NONLINEARITY

Abstract. The article presents the results of linear and nonlinear calculations of monolithic reinforced concrete floor slabs, obtained on the basis of a spatial model of the structural system of a high-rise residential complex. The formation of the model and general calculations by the finite element method were performed in the MONOMAKH-CAD software package.

Key words: high-rise building, structural system, monolithic reinforced concrete floor slabs, MONOMAKH-CAD software package, FEM-calculation, physical nonlinearity, rigidity characteristics, elastic modulus.

Введение. Расчет строительных конструкций, зданий и сооружений с учетом различных видов нелинейностей – важная и сложная научно-техническая задача, решением которой занимаются многие ученые и инженеры [1 – 5]. Применение в практике проектирования закономерностей работы строительных конструкций за пределами линейных законов позволяет выявлять дополнительные резервы несущей способности, снижать материалоемкость, осуществлять моделирование процессов жизненного цикла, этапов нагружения и возведения, учитывать изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции во времени при эксплуатации, обеспечивать устойчивость от прогрессирующего обрушения. Все это в конечном итоге приводит к принятию наиболее экономичных и эффективных решений [2; 6].

Очевидно, что подобные расчеты очень трудо- и ресурсоемки. Даже не смотря на стремительное развитие компьютерных технологий в последние несколько десятилетий, большая часть всех расчетов строительных конструкций производится на основе упрощенных физических моделей [3; 4].

Сегодня в практике проектирования строительных конструкций, зданий и сооружений широко применяются программные комплексы компьютерного инженерного анализа (CAE), основанные на методе конечных элементов (МКЭ). Данный метод является основным в современной строительной механике и позволяет в значительной степени автоматизировать расчет. Примерами комплексов CAE являются пакеты программ ANSYS, NASTRAN, COSMOS, STARK, SCAD, ЛИРА, МОНОМАХ и другие [7]. Кроме того, многие из этих программных комплексов поддерживают технологию информационного моделирования (BIM). Она в последнее время все больше проникает в строительную отрасль, диктуя новый подход в проектировании инженерных объектов, основанный на создании полноценных информационных моделей. Данные передовые технологии разрабатываются с целью – приблизить теоретические расчеты к фактической работе конструкций и научиться прогнозировать их состояние с течением времени.

Цель работы – выполнить расчет и анализ напряженно-деформированного состояния монолитных плит перекрытий высотного жилого комплекса с учетом нелинейных свойств железобетона.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: создать пространственную модель конструктивной системы высотного жилого комплекса в ПК МОНОМАХ-САПР; выполнить линейный и нелинейный расчеты методом конечных элементов и анализ полученных результатов; изучить возможность использования упрощенных моделей для оценки действительной работы монолитных плит перекрытий с учетом физической нелинейности железобетона.

Результаты исследования и их анализ. Принимая во внимание вышесказанное, следует отметить, что расчет нелинейных систем является более сложной задачей по сравнению с решением линейных задач, основанных на обобщенном законе Гука, т.е. линейных зависимостях между напряжениями (σ) и деформациями (ε).

В данной работе нас интересует физическая нелинейность, при которой связь между напряжениями и деформациями записывается в общем виде так:

$$\sigma = E(\varepsilon) \varepsilon ,$$

где $E(\varepsilon)$ – это матрица, характеризующая физические свойства материала.

Таким образом, учитывая физическую нелинейность, получаем систему нелинейных алгебраических уравнений, решение которой находится с помощью шаговых или

итерационных методов. При этом среди известных алгоритмов расчета нелинейных систем отсутствует какой-либо универсальный способ. Эффективность каждого из методов зависит, главным образом, от типа и параметров проявляющейся нелинейности [5].

В специализированном программном комплексе МОНОМАХ-САПР 2013 реализована возможность учета физической нелинейности железобетона при расчете конструкций монолитных высотных зданий [8; 9]. Объектом наших исследований является 25-ти этажный жилой комплекс высотой 99,55 м со стилобатом и подземными этажами. В работе [10] приводятся архитектурные и конструктивные решения здания, а также результаты линейного и нелинейного расчетов пространственной модели монолитной конструктивной системы, выполненных в ПК МОНОМАХ-САПР.

На рисунке 1 представлена расчетная схема здания, которая состоит из оболочечных и стержневых конечных элементов. Общие расчеты при эксплуатационных нагрузках и воздействиях показали, что принятая монолитная несущая система обеспечивает прочность, устойчивость и пространственную неизменяемость высотного здания и его отдельных элементов. Полученные основные параметры конструктивной системы (горизонтальные перемещения верха, перекос этажных ячеек, прогибы элементов перекрытий, коэффициенты запаса устойчивости, средняя осадка, разность осадок и другие) не превышают предельно допустимых значений, установленных соответствующими нормативными документами [11–14].

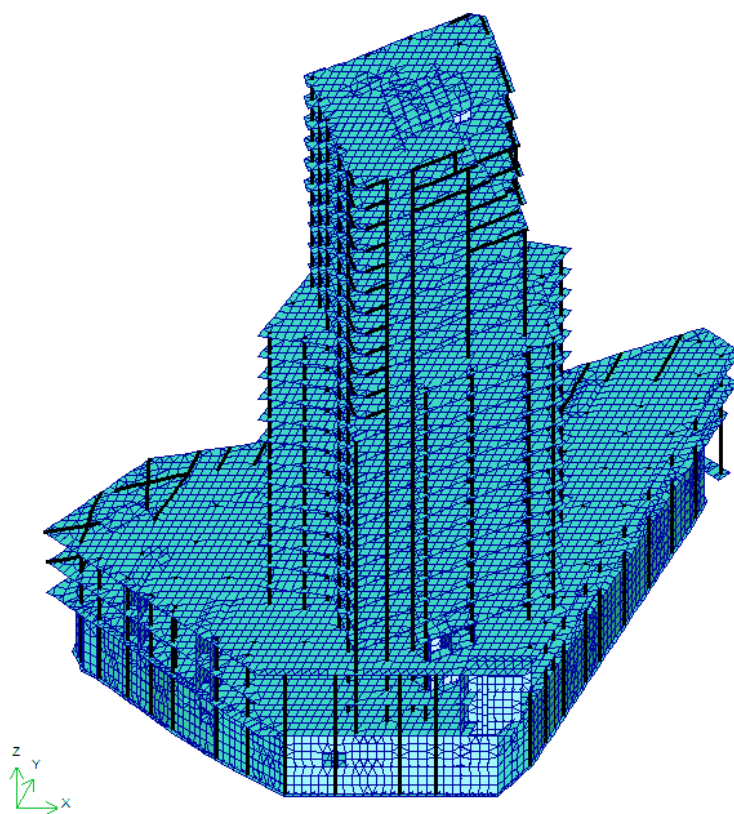


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная схема здания.

В процессе нагружения железобетонных конструкций, как на стадии возведения, так и в процессе эксплуатации могут проявиться такие специфические особенности железобетона, как ползучесть или возникновение трещин в растянутых зонах. Вследствие чего, будет происходить изменение жесткостных характеристик элементов. Это приводит к перераспределению усилий, значительному увеличению перемещений по сравнению с линейно-упругим расчетом.

Нормативные документы ориентируют инженера на учет этих факторов при проектировании. В сводах Правил Российской Федерации (СП 63.13330.2012, СП 267.1325800.2016, СП 430.1325800.2018) рекомендуется проводить расчет конструктивных систем в пространственной постановке с учетом физической нелинейности материалов [13 – 15]. Выполнение нелинейного расчета занимает значительное время и требует существенных вычислительных мощностей компьютеров, а также соответствующего программного обеспечения. В связи с этим, для учета вышеизложенных факторов в инженерных расчетах предлагается вводить понижающие коэффициенты при определении модуля упругости бетона и жесткости сечений. Согласно п. 8.2.4.15 СП 267.1325800.2016 [14] эти коэффициенты равны: 0,6 – для вертикальных сжатых элементов; 0,2 – для изгибаемых элементов при наличии трещин и 0,3 – при отсутствии трещин. Конечно, такое предположение только приблизительно учитывает снижение жесткости сечений в зависимости от характера напряженно-деформированного состояния элемента. В таблице 1 представлены значения начального модуля упругости бетона E_{b0} и с учетом понижающих коэффициентов – $E_{b,\tau}$ для вертикальных и горизонтальных несущих конструкций здания.

Таблица 1

Снижение начального модуля упругости бетона согласно СП 267.1325800.2016

Класс бетона	E_{b0}	Для вертикальных сжатых элементов		Для плит перекрытий (покрытий) при отсутствии трещин	
		понижающий коэффициент	$E_{b,\tau}$	понижающий коэффициент	$E_{b,\tau}$
	МПа		МПа		МПа
B35	34500	0,6	20700	0,3	10350
B40	36000	0,6	21600	0,3	10800
B60	39500	0,6	23700	0,3	11850

В соответствии с п. 6.1.15 СП 63.13330.2012 [13] при продолжительном действии нагрузки значение модуля деформаций бетона следует определять по формуле

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

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

Вычисленные по СП 63.13330.2012 значения модуля деформаций бетона при продолжительном действии нагрузки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Снижение начального модуля упругости согласно СП 63.13330.2012

Класс бетона	E_{b0}	$\varphi_{b,cr}$	$E_{b,\tau}$
	МПа		МПа
B35	34500	2,1	11129,03
B40	36000	1,9	12413,79
B60	39500	1,4	16458,33

Оба этих подхода позволяют оценить действительную ситуацию. Это можно продемонстрировать на примере следующих расчетов конструктивной системы здания.

Результаты определения напряженно-деформированного состояния монолитных плит перекрытий, полученные на основе линейных и нелинейных расчетов конструктивной системы здания, представлены на графиках (рис. 2 – 5). 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 (табл. 1 и 2).

На рисунках 2 и 3 показаны графики экстремальных (максимальных и минимальных) значений перемещений плит перекрытий -2 – 25 этажей соответственно.

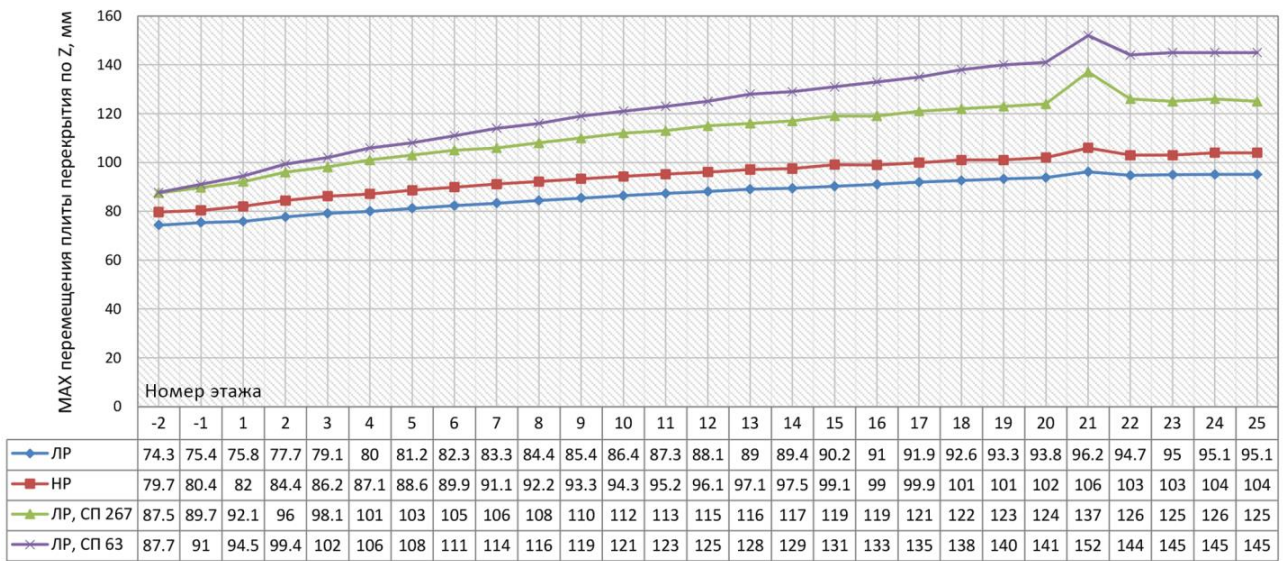


Рис. 2. Графики максимальных перемещений плит перекрытий при различных методах расчета.

Максимальные значения перемещений, полученные при упрощенном расчете по рекомендациям СП 267.1325800.2016, превышают значения перемещений при линейном расчете (ЛР) на 15,09 % – 29,78 %. Результаты расчета, полученные по рекомендациям СП 63.13330.2012, превышают результаты линейного расчета (ЛР) на 15,28 % – 36,71 %. Меньшее превышение значений наблюдается при анализе минимальных перемещений плит перекрытий.

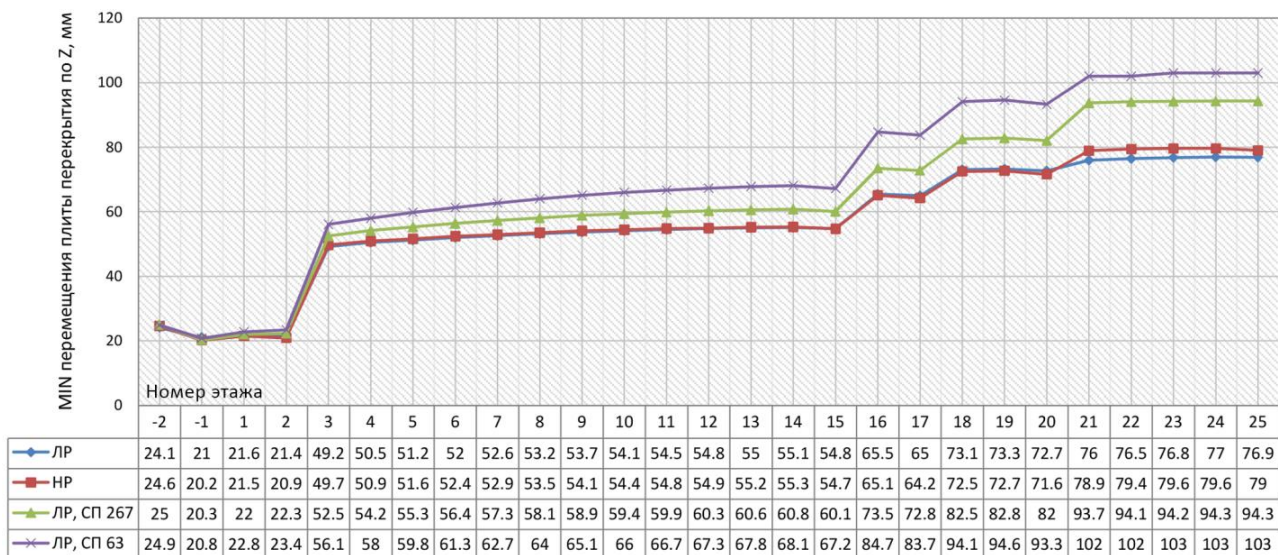


Рис. 3. Графики минимальных перемещений плит перекрытий при различных методах расчета.

На рисунках 4 и 5 показаны графики экстремальных значений опорных и пролетных изгибающих моментов в плитах перекрытий -2 ÷ 25 этажей соответственно, полученные при линейном и нелинейном расчетах.

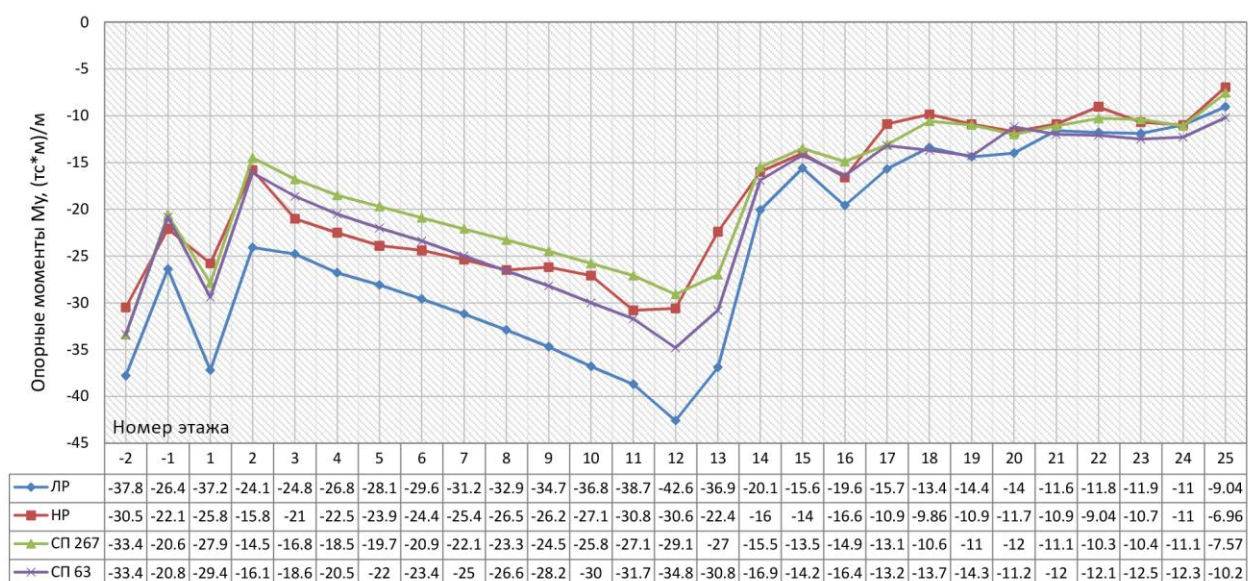


Рис. 4. Сравнение опорных моментов (M_y) плит перекрытий при различных методах расчета.

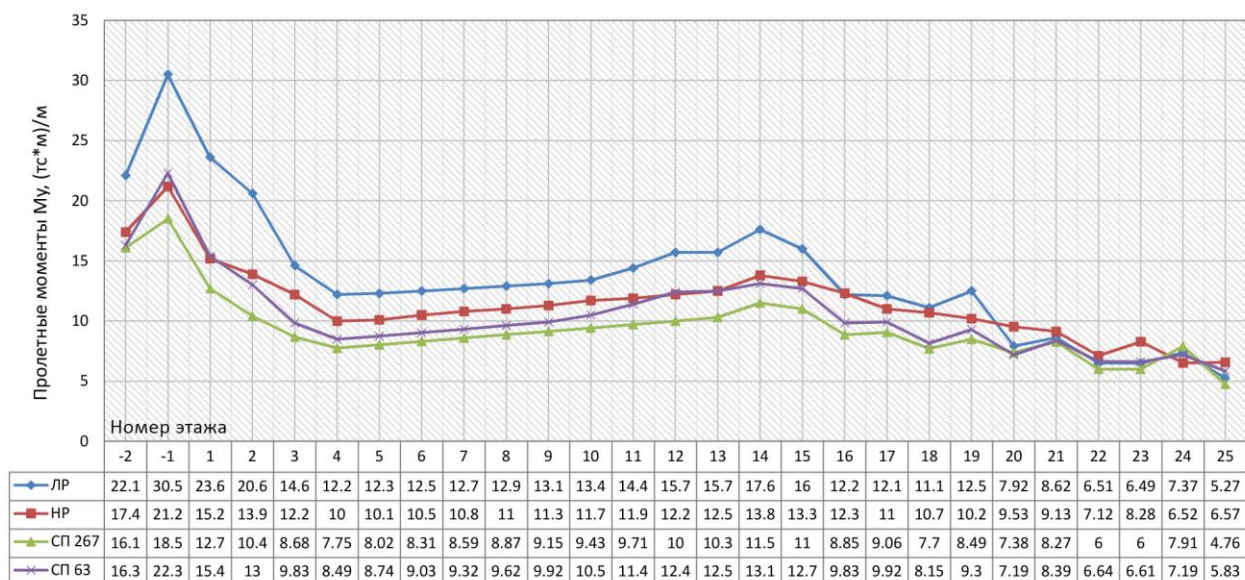


Рис. 5. Сравнение пролетных моментов (M_y) плит перекрытий при различных методах расчета.

Выводы. На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Снижение модуля упругости бетона и жесткости сечений согласно рекомендациям СП 267.1325800.2016 и СП 63.13330.2012 существенно сказывается на результатах вертикальных перемещений конструктивной системы в целом;

2. Анализ результатов опорных и пролетных изгибающих моментов в плитах перекрытий показал следующие зависимости. Как при нелинейном расчете, так и при линейных расчетах с пониженными модулями упругости бетона, значения моментов в плитах уменьшаются практически на всех этажах. Более того, результаты нелинейного и упрощенных расчетов по рекомендациям СП 267.1325800.2016 и СП 63.13330.2012 очень похожи по характеру изменения от этажа к этажу и близки по значениям. Этот факт позволяет в некоторой степени утверждать, что предварительно оценить действительную работу железобетонных конструкций можно упрощенными методами, определяя жесткости сечений с помощью условных понижающих коэффициентов. Такие расчеты следует выполнять только лишь для начального анализа работы конструкций и конструктивной системы в целом;

3. На последующих этапах расчета конструктивной системы, когда известно армирование железобетонных элементов, для получения более точных результатов необходимо производить расчет с учетом нелинейных жесткостей, учитывающих армирование, образование трещин и развитие неупругих деформаций в бетоне и арматуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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 15.03.2021).
3. 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.
4. Блохина Н. С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестник МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 384-387.
5. Сухов М. Ф., Кожанов Д.А. Нелинейные задачи строительной механики : учеб. пособие. – Н. Новгород : Изд-во ННГАСУ, 2017. – 66 с.
6. Уткина В. Н., Безрукова Е. С. Исследование устойчивости несущей системы каркасно-монолитного здания к прогрессирующему обрушению // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию засл. деятеля науки РФ, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селяева В. П., 3–5 дек. 2019 г., г. Саранск / редкол.: В. П. Селяев, А. Л. Лазарев (отв. ред.) и др. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 381-388.
7. Фокин В. Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: учеб. пособие. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.
8. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: АСВ, 2009. – 344 с.
9. Городецкий Д. А., Юсипенко С. В., Батрак Л. Г., Лазарев А. А., Рассказов А. А. МОНОМАХ-САПР 2013. Примеры расчета и проектирования : учеб. пособие. – К. : Электронное издание, 2013. – 368 с.
10. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Проектирование монолитных железобетонных плит перекрытий высотного жилого комплекса с применением ПК МОНОМАХ-САПР [Электронный ресурс] // Огарёв-online. – 2020. – № 3. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/proektirovanie-monolitnykh-zhelezobetonnykh-plit-perekrytij-vysotnogo-zhilogo-kompleksa-s-primeneniem-pk-monomax-sapr> (дата обращения 02.03.2021).

11. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М. : Стандартинформ, 2018. – 95 с.
12. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3). – М. : Стандартинформ, 2017. – 162 с.
13. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : Минстрой России, 2012. – 168 с.
14. СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования. – М. : Стандартинформ, 2017. – 102 с.
15. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2018. – 67 с.

РОДИН А. И., ЕРМАКОВ А. А.

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ
НА ОСНОВЕ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ CaCO_3 ¹**

Аннотация. Описаны особенности получения пористых стеклокерамических материалов на основе трепелов с содержанием CaCO_3 в составе более 20%. Разработаны пористые стеклокерамические материалы со средней плотностью от 255 до 290 кг/м³ и прочностью при сжатии от 3,2 до 5 МПа. По прочности при сжатии (при равной средней плотности) разработанные материалы превосходили пеностекло.

Ключевые слова: пеностеклокерамика, физико-механические свойства, трепел, диатомит, CaCO_3 .

RODIN A. I., ERMAKOV A. A.

**PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF SILICA-BASED FOAM GLASS
CERAMICS WITH HIGH CONTENT OF CaCO_3**

Abstract. The features of obtaining porous glass-ceramic materials based on tripoli with a CaCO_3 content of more than 20% are described. Porous glass-ceramic materials with an average density of 255 to 290 kg/m³ and compressive strength of 3.2 to 5 MPa have been developed. In terms of compressive strength (with equal average density), the developed materials surpassed foam glass.

Key words: porous glass ceramics, physical and mechanical properties, tripoli, diatomite, CaCO_3 .

Пористые стеклокерамические материалы благодаря ряду положительных качеств, таких как высокая прочность, низкая теплопроводность, негорючесть, экологичность и др., широко применяются в промышленном и гражданском строительстве. Для производства пористой стеклокерамики используют различные сырьевые компоненты. В промышленном и гражданском строительстве широко применяются пеностеклокерамические материалы из отходов стекла [1–2]. Хорошими физико-механическими и теплофизическими свойствами обладает стеклокерамика на основе отходов производства [3]. Большое количество научных исследований посвящено разработке составов и исследованию свойств пористых стеклокерамических материалов из кремнистых пород (диатомит, трепел, опока) [4–6].

Известно, что залогом получения качественных строительных материалов является выполнение при их производстве рациональных технологических операций, а также

¹ Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-00213).

постоянство состава сырьевых компонентов. Последнее условие выполнить сложнее всего. Например, кремнистые породы различных месторождений имеют значительные различия в химическом и минералогическом составе. Трепелы зачастую содержат в своем составе большое количество CaCO_3 [7]. В результате нагрева в шихте в большом количестве образуется CaO в результате разложения карбоната, который значительно снижает вязкость расплава, делая невозможным использование трепелов в качестве сырья для производства пористых стеклокерамических материалов.

Цель исследования заключалась в разработке составов и исследовании физико-механических свойств пористых стеклокерамических материалов на основе кремнистых пород с высоким содержанием CaCO_3 .

Компоненты шихты для получения образцов пористых стеклокерамических материалов:

- кремнистые породы: два вида трепела, один вид диатомита (влажность $\leq 1\%$).

Минералогический состав пород приведен в таблице 1;

- пламень: термонарит (химическая формула – $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Массовая доля основного вещества не менее 99 %.

Таблица 1

Минералогический состав пород

Порода	Минералогический состав, %						
	Кальцит	Гейландит	Мусковит	Кристаллит	Кварц	Тридимит	Аморфная фаза
Трепел №1	21,3	19,6	9,9	19,2	8,5	1,5	20,0
Трепел №2	22,4	19,8	14,3	11,4	11,1	1,0	20,0
Диатомит	0,0	0,0	10,7	0,0	14,3	0,0	75,0

Шихту для изготовления образцов пористых стеклокерамических материалов получали совместным помолот трепела, диатомита и пламени ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Количество диатомита в составе шихты варьировалось от 34,5 до 45%. Количество пламени принималось равным 21% от массы шихты. Размол осуществлялся в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 400 в течение 90 мин при частоте вращения размольных стаканов равной 250 оборотов в минуту.

Полученная шихта засыпалась в металлическую форму, предварительно обработанную каолиновой обмазкой. Форма с шихтой устанавливалась в муфельную печь и нагревалась со скоростью $4,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до температуры равной 850°C с выдержкой в течение 60 мин при температуре 600°C и в течение 30 мин при температуре 850°C . После остывания формы с полученным материалом вместе с печью до 40°C , она разбиралась, а образцы извлекались для дальнейших испытаний.

Плотность и прочность при сжатии пеностеклокерамических материалов определяли на сухих кубических образцах с размером грани 90 ± 5 мм. За максимальное разрушающее усилие при определении прочности при сжатии принималось значение, при котором образец разрушался с растрескиванием или сминался в поверхностных слоях на 10% от первоначального значения высоты. За окончательный результат принималось среднеарифметическое значение результатов испытания пяти образцов каждого состава.

На рисунке 1 представлены результаты исследования влияния минералогического состава шихты (кремнистая порода + термонатрит) на среднюю плотность и прочность при сжатии образцов пористой стеклокерамики. В ходе эксперимента было испытано 5 составов по пять образцов в каждом.

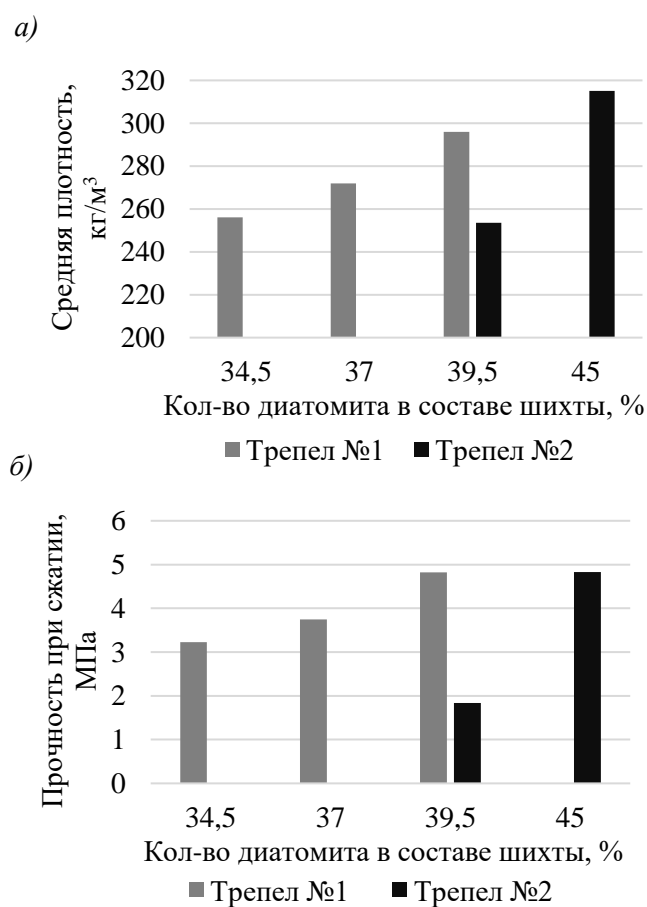


Рис. 1. Средняя плотность (а) и прочность при сжатии (б) образцов пористых стеклокерамических материалов.

Из полученных данных (рис. 1, а) следует, что с увеличением количества диатомита в составе шихты средняя плотность образцов пористых стеклокерамических материалов увеличивается по линейной зависимости. Например, плотность образцов выше почти на 15% при увеличении в составе шихты диатомита с 34,5 до 39,5% (образцы получены на основе трепела №1). Вероятно, это можно объяснить тем, что уменьшение средней плотности образцов при замене части трепела на диатомит является следствием уменьшения в составе

шихты содержания гейландита (минерал из группы цеолитов). Из литературы известно [7], что минералы из группы цеолитов являются одними из основных источников порообразования при получении стеклокерамических материалов на основе кремнистых пород (за один нагрев шихты). Согласно проведенным исследованиям, наименьшая средняя плотность ($\approx 255 \text{ кг/м}^3$) у образцов с содержанием диатомита в количестве 34,5% от массы шихты. Суммарное содержание гейландита в составе кремнистых пород, из которых изготовлены данные образцы, составляет 11%. Результаты, полученные при испытании образцов на основе трепела №2 с содержанием диатомита в количестве 39,5%, не учитывались, так как они имели неравномерную пористую структуру (см. рис. 2). Наибольшая плотность у образцов состава: 34% трепела №2, 45% диатомита и 21% термонатрита. В этом случае количество гейландита в составе породы наименьшее (8,5%).

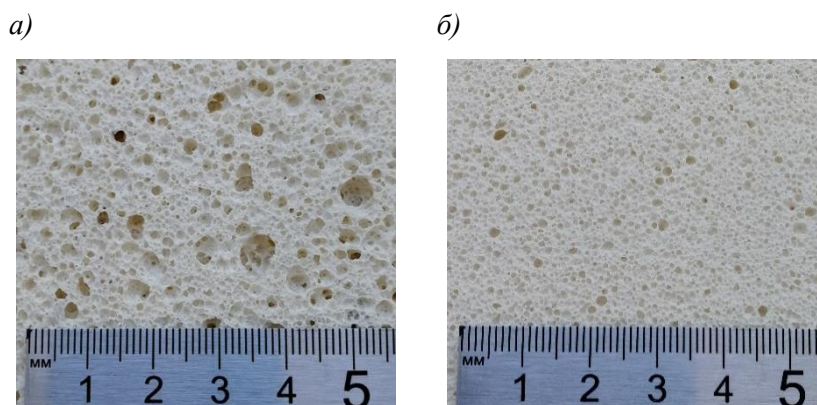


Рис. 2. Макроструктура поверхности образцов пеностеклокерамики на основе шихты:
а – 39,5% трепела №2, 39,5% диатомита и 21% термонатрита;
б – 44,5% трепела №1, 34,5% диатомита и 21% термонатрита.

Несмотря на ухудшение некоторых показателей, например, увеличение плотности, введение в состав шихты диатомита в отдельных случаях необходимо. Согласно данным таблицы 1, в составе используемых трепелов содержится большое количество кальцита ($>20\%$). Без добавления в состав шихты диатомита, получить пеностеклокерамические материалы на основе данных пород не удалось. Образцы на основе трепела состава №1 (21,5% CaCO_3) имеют равномерную пористую структуру при замене в составе шихты минимум 45% трепела на диатомит. Из состава с трепелом №2 (22,4% CaCO_3) удалось получить пористые стеклокерамические материалы при содержании в составе шихты не менее 50% диатомита от общей массы кремнистых пород. Согласно данным таблицы 1, используемый в работе диатомит на 75% состоит из аморфной фазы, которая характеризуется высокой реакционной способностью. При введении в состав шихты диатомита увеличивается количество расплава при меньшей температуре, материал имеет однородную структуру [5]. Кроме того, с заменой части трепела на диатомит в составе шихты уменьшается количество кальцита, который, как известно [7], способствует появлению в шихте расплава при более высоких температурах.

В результате проведенных исследований (рис. 1, б) установлено, что прочность при сжатии образцов пористых стеклокерамических материалов находится в линейной зависимости от их средней плотности. Наибольшая прочность при сжатии (≈ 5 МПа) у образцов следующих составов: 1 – 39,5% трепела №1, 39,5% диатомита и 21% термонатрита; 2 – 34% трепела №2, 45% диатомита и 21% термонатрита. Заметим, что средняя плотность образцов первого состава почти на 10% меньше, чем у второго (290 и 315 кг/м³ соответственно). Снижение прочности при сжатии образцов пеностеклокерамических материалов при увеличении в составе шихты количества диатомита, вероятнее всего, связано с уменьшением количества Al_2O_3 в составе материала. Снижение прочностных характеристик стеклокерамических материалов от уменьшения в их составе оксида алюминия показано в работах многих авторов [8; 9].

Согласно проведенным исследованиям, установлено, что для получения равномерной пористой структуры стеклокерамических материалов на основе представленных кремнистых пород с высоким содержанием $CaCO_3$ необходимо, чтобы суммарное количество кристобалита и аморфной фазы было более 55%, а отдельное количество кварца, кальцита и мусковита не превышало 12%. Средняя плотность образцов уменьшается с увеличением в составе шихты гейландита. Прочность при сжатии разработанных пористых стеклокерамических материалов при равной средней плотности больше чем у пеностекла из отходов стекла и промышленного производства [1–3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bai J., Yang X., Xu S., Jing W., Yang J. Preparation of foam glass from waste glass and fly ash // *Materials Letters*. – 2014. – Vol. 136. – P. 52-54.
2. Zhu M., Ji R., Li Z., Wang H., Liu L., Zhang Z. Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 112. – P. 398-405.
3. Yatsenko E. A., Gol'tsman B. M., Kosarev A. S., Karandashova N. S., Smolii V. A., Yatsenko L. A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerol Pore-Forming Mixture // *Glass Physics and Chemistry*. – 2018. – Vol. 44(2). – P. 152-155.
4. Ерофеев В. Т., Родин А. И., Кравчук А. С., Казначеев С. В., Захарова Е. А. Биостойкие пеноситаллы на основе кремнеземсодержащих пород // *Инженерно-строительный журнал*. – 2018. – № 8(84). – С. 48-56.
5. Иванов К.С. Оптимизация структуры и свойств пеностеклокерамики // *Инженерно-строительный журнал*. – 2019. – № 5(89). – С. 52-60..

6. Орлов А. Д. Оптимизированная одностадийная технология гранулированного пеностекла на основе низкотемпературного синтеза стеклофазы // Строительные материалы. – 2015. – № 1. – С. 24-26.
7. Kazantseva L. K., Lygina T. Z., Rashchenko S. V., Tsyplakov D. S. Preparation of Sound-Insulating Lightweight Ceramics from Aluminosilicate Rocks with High CaCO_3 Content // Journal of the American Ceramic Society. – 2015. – Vol. 98(7). – P. 2047-2051.
8. Keyvani N., Marghussian V. K., Rezaie H. R., Kord M. Effect of Al_2O_3 content on crystallization behavior, microstructure, and mechanical properties of $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO}$ glass-ceramics // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2011. – Vol. 8(1). – P. 203-213.
9. Kim E. S., Yeo W. J. Thermal properties of $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ glass-ceramics with Al_2O_3 // Ceramics International. – 2012. – Vol. 38(1). – P. S547-S550.

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МОНОЛИТНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОТНОГО
ЗДАНИЯ С ВВЕДЕНИЕМ АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИХ ТЕЛ**

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования, расчета и исследования напряженно-деформированного состояния монолитной конструктивной системы высотного здания в ПК МОНОМАХ-САПР. Выполнен анализ результатов с введением абсолютно жестких тел при моделировании сопряжений различных типов конечных элементов.

Ключевые слова: высотное здание, монолитная конструктивная система, моделирование, МКЭ расчет, исследование, напряженно-деформированное состояние, плиты перекрытий, колонны, абсолютно жесткое тело.

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

**MODELING AND RESEARCH OF STRESS-STRAIN STATE OF MONOLITHIC
STRUCTURAL SYSTEM OF HIGH-RISE BUILDINGS
WITH INTRODUCTION OF ABSOLUTELY RIGID BODIES**

Abstract. The article presents the results of modeling, calculation and research of the stress-strain state of a monolithic structural system of a high-rise building in the MONOMAKH-CAD software package. The results are analyzed with the introduction of absolutely rigid bodies in the simulation of conjugations of various types of finite elements.

Keywords: high-rise building, monolithic structural system, modeling, FEM calculation, research, stress-strain state, floor slabs, columns, absolutely rigid body.

Введение. С точки зрения строительной механики, для выполнения каких-либо расчетов, все проектируемые здания, сооружения и отдельные конструкции на начальном этапе создания расчетной схемы должны быть максимально упрощены и идеализированы. Этот процесс опытные специалисты, зачастую, выполняют на подсознательном уровне.

Начиная с 60-х годов XX столетия, в практику проектирования строительных конструкций активно внедряются различные расчетные комплексы, развитие которых в настоящее время происходит темпами геометрической прогрессии.

Сегодня у современных проектировщиков может складываться стойкий стереотип об обесценивании практических навыков конструирования и расчетов в связи с повсеместным переходом к технологиям параметрического моделирования как сложных, уникальных архитектурных объектов, так и элементарных. Это заблуждение становится по-настоящему

глобальной проблемой зависимости проектировщиков от сложных расчетных комплексов, которую еще только предстоит ощутить.

С развитием возможностей программного обеспечения необходимо уделять огромное внимание умению современных инженеров анализировать полученные результаты и своевременно выявлять всевозможные ошибки и неточности.

По своей сути, процесс проектирования любого инженерного сооружения проходит в несколько основных стадий. Сначала архитектурный объект нужно идеализировать для возможности выполнения упрощенного расчета, а затем частично детализировать, т.е. восстановить некоторые параметры конструкций и материалов для более сложных расчетов (например, с учетом различных нелинейностей или моделирования узлов) [1; 2].

Стремление приблизить теоретические модели к их реальной работе за счет выполнения специальных расчетов позволяет получать наиболее рациональные и экономически оправданные решения проектируемого объекта. Но именно на этапе детализации, как правило, возникают всевозможные ошибки, избежать которые можно в результате более глубокого понимания инженерами реальной работы конструкций и материалов.

В данной статье основное внимание уделяется вопросу моделирования отдельных конструктивных решений, а именно примыкания вертикальных несущих элементов (колонн и стен) к горизонтальным (плитам перекрытий) за счет введения абсолютно жестких тел (АЖТ), позволяющих учитывать «тело» колонн и стен в расчетной схеме высотного каркасно-монолитного здания.

Цель работы: выполнить моделирование, расчет и анализ результатов напряженно-деформированного состояния монолитной конструктивной системы высотного здания с введением абсолютно жестких тел при сопряжении колонн, стен и плит в пространственной расчетной схеме.

Задачи: сформировать пространственную модель конструктивной системы высотного здания в ПК МОНОМАХ-САПР; выполнить общие расчеты системы методом конечных элементов без учета и с учетом АЖТ в узлах сопряжений колонн и стен с плитами перекрытий; провести сравнительный анализ результатов напряженно-деформированного состояния несущих железобетонных конструкций.

Результаты исследования. Для решения поставленных выше задач и проведения всестороннего исследования железобетонных конструкций была использована созданная ранее в специализированном программном комплексе ПК МОНОМАХ-САПР пространственная модель высотного жилого комплекса [3; 4]. Монолитная конструктивная система здания состоит из фундаментной плиты, центрального ядра жесткости, колонн, стен,

плит перекрытий и покрытия, которые работают под нагрузкой совместно. Расчетная пространственная модель здания включает все несущие конструктивные элементы. Плиты перекрытий и покрытия, стены и фундаментная плита представлены в расчетной схеме элементами плоской оболочки, колонны – стержневыми конечными элементами. Сопряжения стержневых элементов колонн с элементами плит перекрытий этажей ($-2 \div 25$) моделируем с использованием абсолютно твердых тел, реализующих кинематическую гипотезу о недеформируемых поперечных сечениях колонн. Такой подход позволяет получать более корректные результаты при определении усилий и армирования в опорных зонах плит, так как смягчает нежелательный эффект сингулярности, свойственный методу конечных элементов.

Генерация абсолютно жестких тел для вертикальных несущих элементов в некоторой степени компенсирует погрешности, вносимые упрощениями физической модели, принятыми при построении расчетной схемы. Наиболее важные преимущества использования АЖТ – срезание пиков моментов на опорах и уменьшение пролетов плиты.

Проведены исследования пространственной модели конструктивной системы высотного здания без учета и с учетом АЖТ в ПК МОНОМАХ-САПР. В процессе МКЭ расчета абсолютно жесткие тела генерируются автоматически для тех колонн и стен, которым назначено свойство «Генерировать АЖТ». Сечение колонны может быть любой формы (круглое, квадратное, тавровое, крестовое и др.).

Перед выполнением расчета в окне диалога «МКЭ расчет» дополнительно отмечается флажок «Генерировать АЖТ колонн и стен, имеющих такое свойство» [5]. В местах примыкания наблюдаются некоторые сгущения и уплотнения сетки конечных элементов в плите (рис. 1).

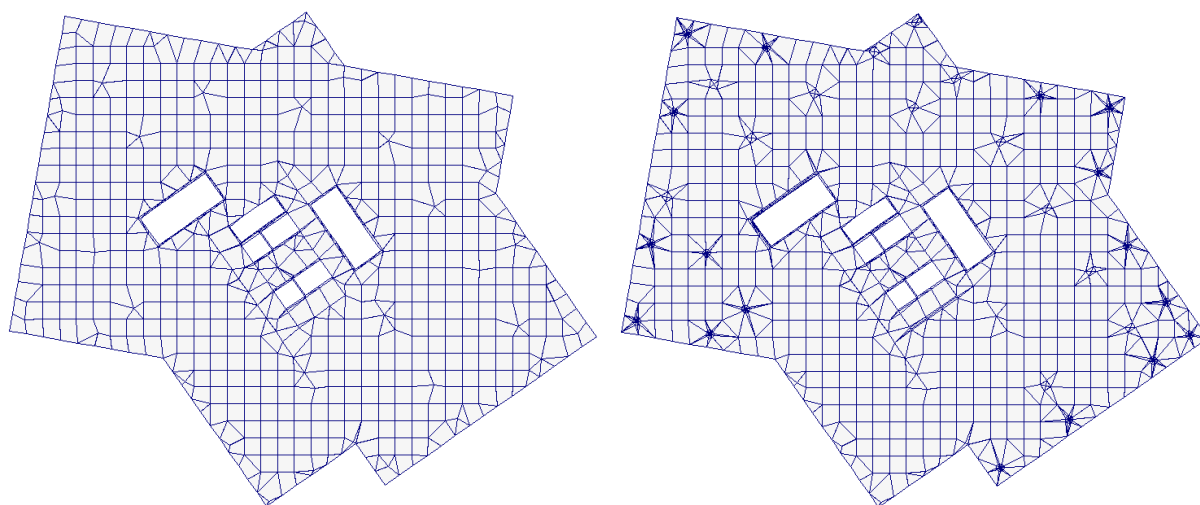


Рис. 1. Сетка конечных элементов плиты перекрытия 11-го этажа:
слева – без учета АЖТ, справа – с учетом АЖТ.

В таблице 1 представлено сравнение результатов вертикальных перемещений плит перекрытий при линейном расчете конструктивной системы без учета (ЛР) и с учетом АЖТ (ЛР, АЖТ) для колонн и стен. Расчет производился для сочетания нагрузок (постоянное + длительное + ветер 1). Анализируя результаты, приведенные в данной таблице, можно отметить, что максимальные значения перемещений уменьшились во всех плитах перекрытий -2 ÷ 25 этажей. Относительное отклонение данных значений невелико и не превышает 2,91%. Минимальные перемещения также изменились в пределах 2 – 3%, однако нельзя сказать однозначно в какую сторону. До 17-го этажа (включительно) перемещения увеличивались, а начиная с 18-го этажа уменьшались. Такая зависимость может быть обусловлена изменением конфигурации и пролетов плит перекрытий верхних этажей.

Таблица 1

**Сравнение результатов вертикальных перемещений плит перекрытий для моделей
без учета и с учетом АЖТ для колонн и стен**

Этаж	Перемещения по Z, мм (ЛР)		Перемещения по Z, мм (ЛР, АЖТ) и отклонение %			
	max	min	max	отклонение, %	min	отклонение, %
1	2	3	4	5	6	7
-2	81,40	26,20	80,10	1,62	26,30	0,38
-1	82,80	23,30	81,50	1,60	23,60	1,27
1	83,10	24,00	81,80	1,59	24,10	0,41
2	84,80	23,70	83,10	2,05	24,00	1,25
3	86,30	54,40	85,50	0,94	55,40	1,81
4	87,30	55,70	86,30	1,16	56,80	1,94
5	88,50	56,50	87,60	1,03	57,80	2,25
6	89,70	57,30	88,70	1,13	58,70	2,39
7	90,90	58,10	89,80	1,22	59,50	2,35
8	92,00	58,70	91,00	1,10	60,30	2,65
9	93,10	59,30	92,00	1,20	60,90	2,63
10	94,20	59,80	93,10	1,18	61,40	2,61
11	95,10	60,10	94,00	1,17	61,90	2,91
12	96,00	60,40	95,00	1,05	62,20	2,89
13	97,00	60,70	95,90	1,15	62,50	2,88
14	97,40	60,90	96,30	1,14	62,70	2,87
15	98,20	60,50	97,10	1,13	62,40	3,04
16	99,10	73,10	97,50	1,64	74,20	1,48
17	100,00	72,60	98,40	1,63	73,70	1,49
18	101,00	80,70	99,20	1,81	79,80	1,13
19	102,00	81,00	99,90	2,10	80,00	1,25
20	102,00	80,30	101,00	0,99	79,40	1,13
21	106,00	82,70	103,00	2,91	81,90	0,98
22	103,00	83,10	102,00	0,98	82,30	0,97
23	103,00	83,50	102,00	0,98	82,60	1,09
24	103,00	83,70	102,00	0,98	82,90	0,97
25	103,00	83,60	102,00	0,98	82,80	0,97

Влияние введения абсолютно жестких тел на изменение значений изгибающих моментов в плитах перекрытий всех этажей (-2 – 25) удобнее всего представить в виде графиков (рис. 2 – 5). На рисунках 2 и 3 представлено сравнение экстремумов опорных моментов M_x и M_y , а на рисунках 4 и 5 – пролетных моментов в плитах при линейном расчете (ЛР) без учета и с учетом абсолютно жестких тел (ЛР, АЖТ) от основного сочетания нагрузжений (постоянное + длительное + кратковременное + ветер 1).

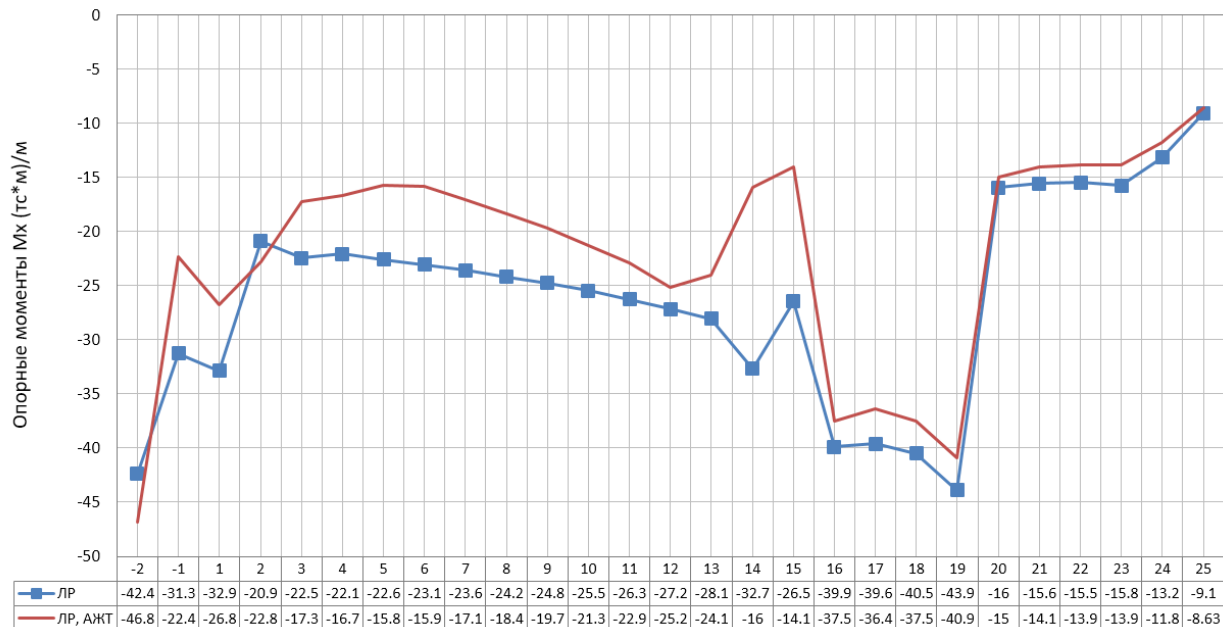


Рис. 2. Сравнение опорных моментов M_x в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

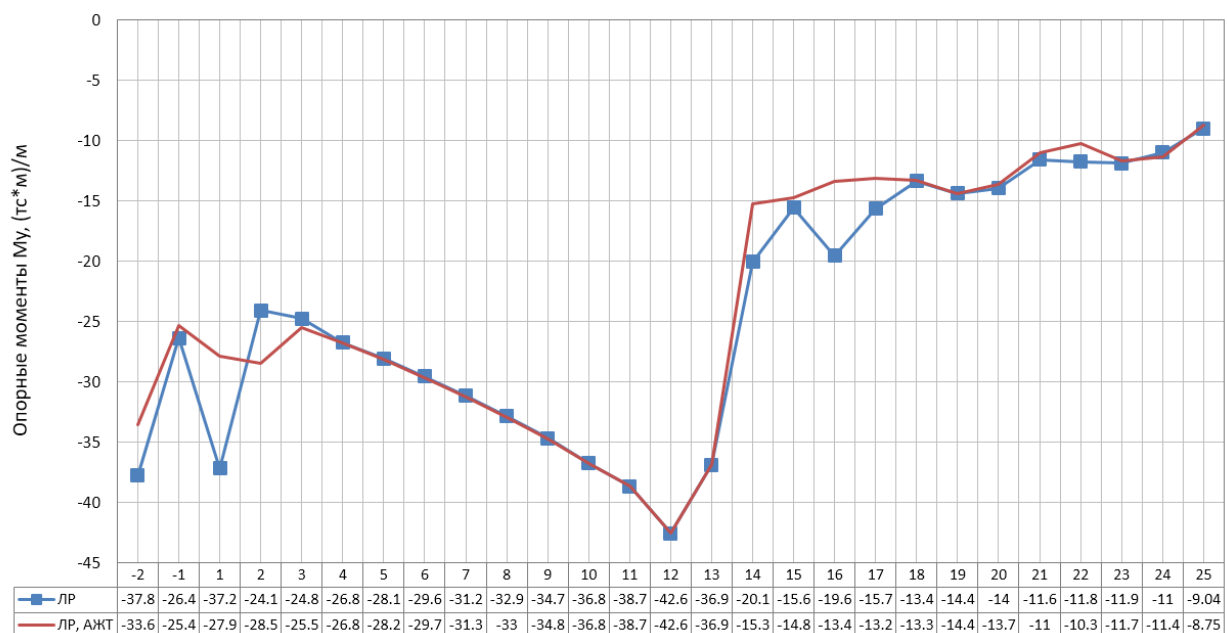


Рис. 3. Сравнение опорных моментов M_y в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

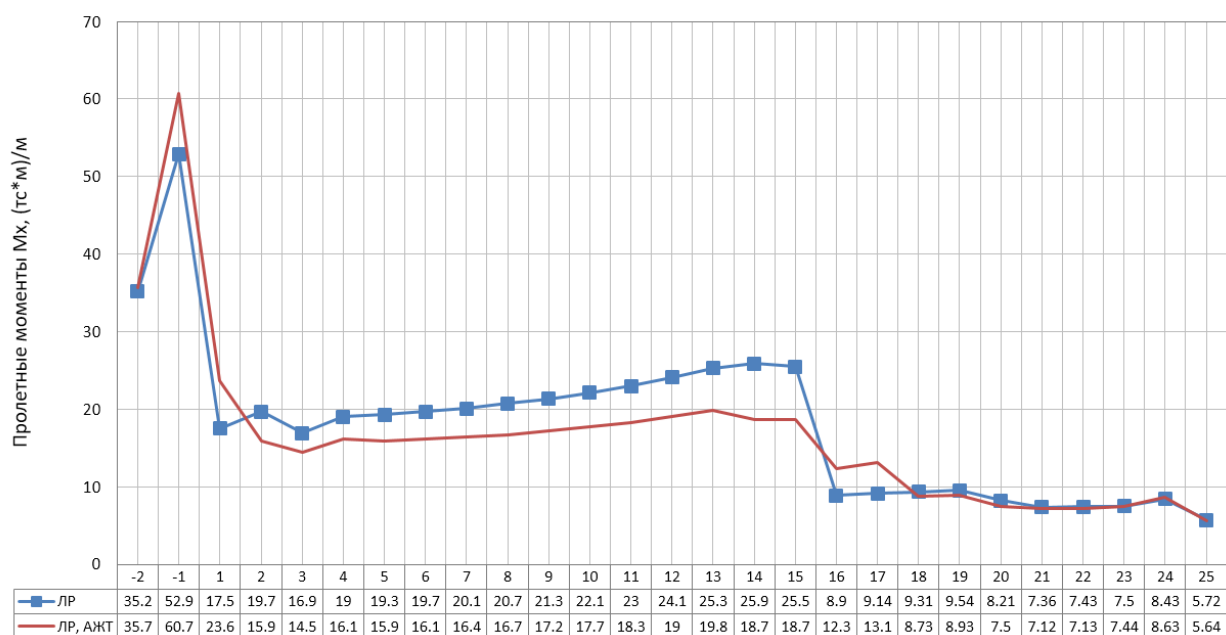


Рис. 4. Сравнение пролетных моментов M_x в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

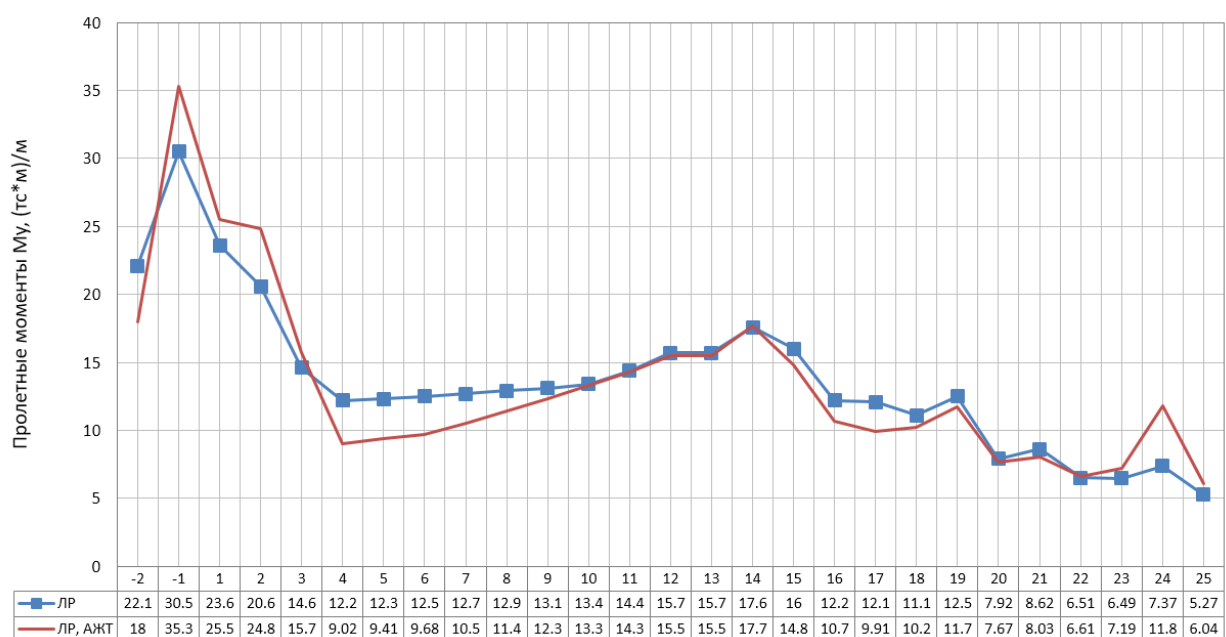


Рис. 5. Сравнение пролетных моментов M_y в плитах при расчете без учета и с учетом абсолютно жестких тел.

Анализ полученных результатов в большей степени подтвердил теоретические предположения об уменьшении изгибающих моментов в пролетах плит перекрытий и сглаживании пиков опорных моментов при введении АЖТ. Сравнение экстремумов изгибающих моментов показало, что снижение M_x в опорной зоне значительное и в некоторых случаях достигает 50 %, а в пролетах – 28 %.

Рассмотрим, как введение АЖТ повлияло на результаты расчета самых нагруженных колонн нижнего этажа. На рисунке 6 показаны номера колонн на фрагменте плана здания и

проценты армирования сечений до и после введения АЖТ соответственно. Результаты определения усилий в сечениях колонн представлены в таблице 2.

Анализ результатов проведенного расчета показал, что в рассматриваемых колоннах 1_95 (K2), 1_103 (K3) и 1_54 (K1) проценты армирования снизились. В колонне 1_70 (K4) процент армирования остался неизменным. Во всех выбранных колоннах уменьшилось значение продольной силы.

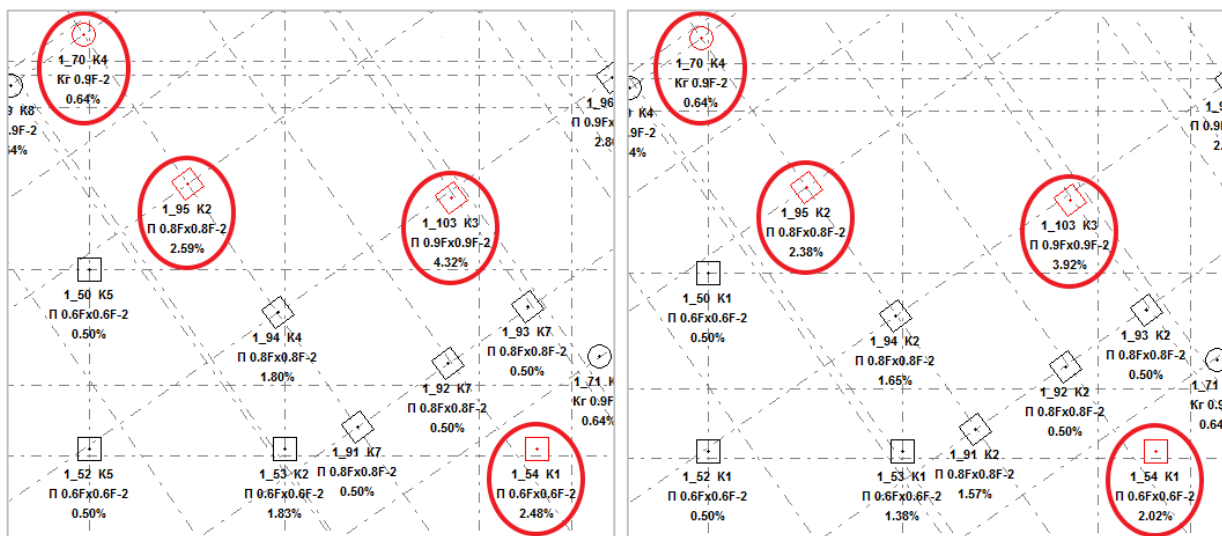


Рис.

Рис. 6. Колонны на плане здания и проценты армирования сечений до (слева) и после введения АЖТ (справа).

Таблица 2

Сравнение результатов расчета для колонн нижнего этажа без учета и с учетом АЖТ при постоянном нагружении

Колонна	N, т			M _y , т*м			M _z , т*м			μ, %		
	ЛР	АЖТ	Δ, %	ЛР	АЖТ	Δ, %	ЛР	АЖТ	Δ, %	ЛР	АЖТ	Δ, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
21	12,2	19,3	36,8	10,7	10,0	7,0	17,7	17,7	0,0	1,3	1,1	16,2
23	99,9	99,6	0,3	45,9	43,7	5,0	9,7	9,1	6,6	0,6	0,5	11,3
24	25,8	9,8	163,3	15,0	17,4	13,8	10,8	10,2	5,9	1,6	1,5	6,9
41	906,2	895,3	1,2	4,1	3,2	28,1	53,3	58,3	8,6	1,0	1,0	5,8
51	43,7	49,8	12,3	42,3	39,8	6,3	38,7	36,6	5,7	0,8	0,7	10,8
53	19,6	35,2	44,3	69,7	64,3	8,4	30,4	30,4	0,0	1,8	1,4	32,6
54	61,4	35,0	75,4	65,7	61,2	7,4	12,7	12,1	5,0	2,5	2,0	22,8
55	60,4	74,6	19,0	50,7	46,1	10,0	25,6	24,5	4,5	0,8	0,6	33,3
57	58,8	92,9	36,7	18,8	21,3	11,7	47,2	21,3	121,6	0,9	0,5	62,3
58	42,5	104,5	59,3	5,5	26,6	79,3	63,2	60,1	5,2	1,6	1,2	32,8
59	53,5	56,0	4,5	28,7	29,3	2,1	68,3	62,8	8,8	1,4	1,2	13,2
60	33,4	41,1	18,7	23,7	25,2	6,0	71,9	65,2	10,3	1,6	1,4	17,7
88	1439,9	1307,8	10,1	56,5	61,3	7,8	202,6	208,1	2,6	1,0	0,6	66,1
89	1384,4	1152,4	20,1	120,9	123,1	1,8	177,0	188,6	6,2	0,6	0,5	16,0
94	1667,3	1623,7	2,7	122,5	133,2	8,0	176,1	179,7	2,0	1,8	1,7	9,1
95	1819,4	1729,0	5,2	75,6	83,0	8,9	202,5	215,9	6,2	2,6	2,4	8,8
96	2335,9	2223,3	5,1	344,3	328,4	4,8	92,2	90,0	2,4	2,9	2,5	16,7
98	1446,4	1316,7	9,9	37,2	36,5	1,9	210,1	217,5	3,4	1,1	0,8	50,7
103	2478,8	2395,5	3,5	457,9	439,0	4,3	134,3	129,3	3,9	4,3	3,9	10,2

Выводы. На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. В программном комплексе МОНОМАХ-САПР реализована возможность проведения сложного расчета пространственных моделей высотных зданий с автоматической генерацией абсолютно жестких тел в местах примыкания колонн и стен к плитам перекрытий. Функционал комплекса позволяет без особых трудностей и за достаточно короткий промежуток времени получить необходимые результаты расчета. Однако не для всех конструкций выполняется автоматическая генерация АЖТ. Можно предположить, что влияет расположение колонн или стен на плане. Так, например, АЖТ не удалось назначить для колонн, расположенных у контура плиты или в угловых зонах. АЖТ не сгенерировались для стен, расположенных вокруг отверстий в плитах. Но, если вышеизложенные факты еще можно понять, то сложно объяснить частные случаи для некоторых колонн, расположенных внутри здания;

2. Подтверждена гипотеза о снижении экстремумов значений изгибающих моментов как на опорах, так и в пролетах плит перекрытий всех этажей, что в конечном итоге позволит конструировать данные плиты экономичнее, чем по результатам расчета модели без введения абсолютно жестких тел;

3. В колоннах нижнего этажа с генерацией АЖТ внутренние усилия перераспределяются, а в самых нагруженных колоннах снижаются продольные силы и проценты армирования сечений. Таким образом, можно однозначно сказать, что введение абсолютно жестких тел при моделировании пространственной расчетной схемы высотного здания очень эффективно. Реализация этого приема позволяет получить более точную картину напряженно-деформированного состояния и экономичные решения для несущих конструкций здания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. – М.: АСВ, 2009. – 344 с.
2. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография. – К.: Сталь, 2014. – 301 с.
3. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Проектирование монолитных железобетонных плит перекрытий высотного жилого комплекса с применением ПК МОНОМАХ-САПР [Электронный ресурс] // Огарёв-online. – 2020. – №3. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/proektirovanie-monolitnyx-zhelezobetonnyx-plit-perekrytij-vysotnogo-zhilogo-kompleksa-s-primeneniem-pk-monomax-sapr> (дата обращения 18.04.2021).

4. Уткина В. Н., Грязнов С. Ю., Бабушкина Д. Р. Оценка надежности монолитных железобетонных плит перекрытий высотного жилого комплекса // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы XI Академических чтений РААСН – Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти первого Председателя Научного Совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», Почетного члена РААСН, д.т.н., проф. Зайцева Ю. В. / редкол.: В. И. Травуш, В. П. Селяев, П. А. Акимов [и др.]; отв. ред. А. Л. Лазарев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – С. 325–336.
5. Городецкий Д. А., Юсипенко С. В., Батрак Л. Г., Лазарев А. А., Рассказов А. А. МОНОМАХ-САПР 2013. Примеры расчета и проектирования : учеб. пособие. – К.: Электронное издание, 2013. – 368 с.

РОДИН А. И., УТЮГОВА Е. С.

**РЕНТГЕНОФАЗОВЫЙ И ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ
ПОРОД ЕНГАЛЫЧЕВСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ¹**

Аннотация. Приведены результаты исследования пяти видов цеолитсодержащих трепелов Енгальчевского проявления Республики Мордовия методами рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и термического анализов. Даны рекомендации по использованию исследованных кремнистых пород при получении строительных материалов.

Ключевые слова: кремнистая порода, цеолитсодержащий трепел, рентгенофазовый анализ, термический анализ, строительные материалы.

RODIN A. I., UTYUGOVA E. S.

**X-RAY PHASE AND THERMAL ANALYSIS OF ZEOLITE-CONTAINING ROCKS OF
THE ENGALYCHEVO MANIFESTATION OF THE REPUBLIC OF MORDOVIA**

Abstract. The results of the study of five types of zeolite-containing tripoli of the Engalychevsky manifestation of the Republic of Mordovia by X-ray fluorescence, X-ray phase and thermal analyzes are presented. Recommendations are given on the use of the studied siliceous rocks in the production of building materials.

Keywords: siliceous rock, zeolite-containing tripoli, X-ray phase analysis, thermal analysis, building materials.

Россия занимает первое место в мире по запасам кремнистых, в том числе цеолитсодержащих, пород (свыше 1,6 млрд т) [1]. Основными видами кремнистых пород являются: диатомит, трепел, опока и др. Они обладают рядом положительных качеств, таких как высокая химическая активность, низкая теплопроводность, высокая термическая стойкость и пр. При производстве строительных материалов кремнистые породы используются в основном в качестве активных минеральных добавок в портландцементе, при получении пенодиатомитовых и трепельных кирпичей, в качестве сырья для производства пеностекла и пеностеклокерамики и др. [2; 3]. Несмотря на многообразие вариантов использования кремнистых пород, их применение в рамках производства конкретных строительных материалов определяется химическим и минералогическим составами.

¹ Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-73-00213).

Цель исследований, результаты которых представлены в данной статье, заключалась в определении рациональных областей применения цеолитсодержащих трепелов Енгальчевского проявления Республики Мордовия при получении строительных материалов.

Использованные в работе кремнистые породы были добыты в юго-восточной части Республики Мордовия: Енгальчевское проявление цеолитсодержащих пород (цеолитсодержащий трепел). Территориально оно расположено в северо-западной части Приволжской возвышенности в области подзоны широколиственных лесов и зоны лесостепи. Представляет собой приподнятую и расчлененную равнину с типичными эрозионными формами рельефа – увалы, балки, овраги. Абсолютные отметки изменяются от 100-150 м на юге территории до 250-314 м в центральной и северной части. В целом для района характерны пологие возвышенности, ровные понижения, широкие долины рек, местами заболоченные. Согласно данным отчета [4], прогнозные ресурсы Енгальчевского проявления цеолитсодержащих пород относятся к категории Р2, что подразумевает возможность обнаружения в данном районе новых месторождений. Запасы пород, согласно данным отчета [4], составляют приблизительно 39 млн. м³.

Координаты мест, из которых добыты пробы, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Координаты мест, из которых добыты пробы

№ пробы	Координаты места, из которого добыта проба	
	С.Ш.	В.Д.
1	54.322331	46.396278
2	54.320929	46.405720
3	54.319302	46.396836
4	54.329338	46.384863
5	54.320654	46.344780

В ходе эксперимента методами рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и термического анализов определены химический и минералогический состав пяти проб трепелов.

Химический состав проб определен методом рентгенофлуоресцентного анализа с помощью прибора ARL 9900 Workstation. Образцы кремнистой породы измельчались в ступке агатовым пестиком с ацетоном до прохождения через сито с апертурой 90 мкм. Подготовленные образцы запрессовывали на подложки из борной кислоты без дополнительного перетирания. Анализ химического состава осуществляли нестандартным методом с использованием программного комплекса OptiQuant.

Рентгенофазовый анализ образцов проводился с помощью дифрактометра ARL X'tra (Швейцария). Образцы проб подготавливались по методике, описанной выше. Регистрация

дифрактограмм осуществлялась на $\text{CuK}_{\alpha 1+2}$ излучении в интервале углов $2\Theta = 4\text{--}80^\circ$ со скоростью $1,2^\circ/\text{минуту}$, с шагом $0,02^\circ$, время интеграции 1 сек. Методом Ханавальта с использованием базы данных ICDD PDF-2 был определен качественный фазовый состав образцов. Методом Ритвельда с использованием программного обеспечения Siroquant 3 Sietronics Pty Ltd определено количественное содержание фаз.

Термический анализ образцов трепелов проводился с помощью прибора TGA/DSC1 (Швейцария). Проба массой $15 \pm 0,1$ мг засыпалась в алундовый тигель объемом 150 мкл. Далее пробу уплотняли постукиванием тигля о стол. Тигель устанавливали на держатель и помещали в печь. Образец нагревался от 30 до 1000°C со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Химический состав трепелов представлен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав пород

№ состава	Химический состав, % масс.											
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	TiO_2	Na_2O	SO_3	P_2O_5	SrO	ППП
1	69,6	6,9	7,1	2,0	1,5	1,0	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	11,3
2	68,5	6,8	6,8	1,8	1,5	1,0	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	12,9
3	67,9	7,7	7,6	2,0	1,6	1,0	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1	11,3
4	56,4	12,5	8,7	2,7	2,0	1,2	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	15,5
5	62,4	11,3	6,7	2,0	1,4	0,9	0,3	0,1	0,0	0,2	0,1	14,6

В результате анализа данных таблицы 2 установлено, что основное отличие в химическом составе исследуемых трепелов связано с количественным содержанием SiO_2 и CaO . Количество SiO_2 в исследуемых пробах находится в пределах от 56,4 до 69,6 %. Наибольшее количество оксида кремния у составов №1-3 (67,9 – 69,6 %), наименьшее (56,4 %) в составе породы № 4. Данная порода отличается повышенным содержанием CaO (более 12 %), что практически в 2 раза больше по сравнению с пробами № 1-3, а также наибольшим количеством Al_2O_3 ($\approx 8,7\%$). Заметим, что значительное количество оксида кальция (более 11 %) содержится также в пробе № 5. Большие потери массы образцов № 4 и 5 после прокаливания возможно являются следствием повышенного содержания в них карбоната кальция в сравнении с пробами № 1-3. Согласно данным таблицы 2, количественное содержание остальных оксидов не сильно меняется от вида пробы.

На рисунке 1 представлены данные рентгенофазового анализа пород. В ходе качественного анализа дифрактограмм, представленных на рисунке 1, было установлено, что в составе исследуемых образцов кремнистых пород идентифицированы минералы трех модификаций кремнезема (β -кварц, β -кристобалит, γ -тридимит), по одному минералу из группы карбонатов (кальцит), цеолитов (гейландит) и слюд (мусковит), а также аморфная фаза.

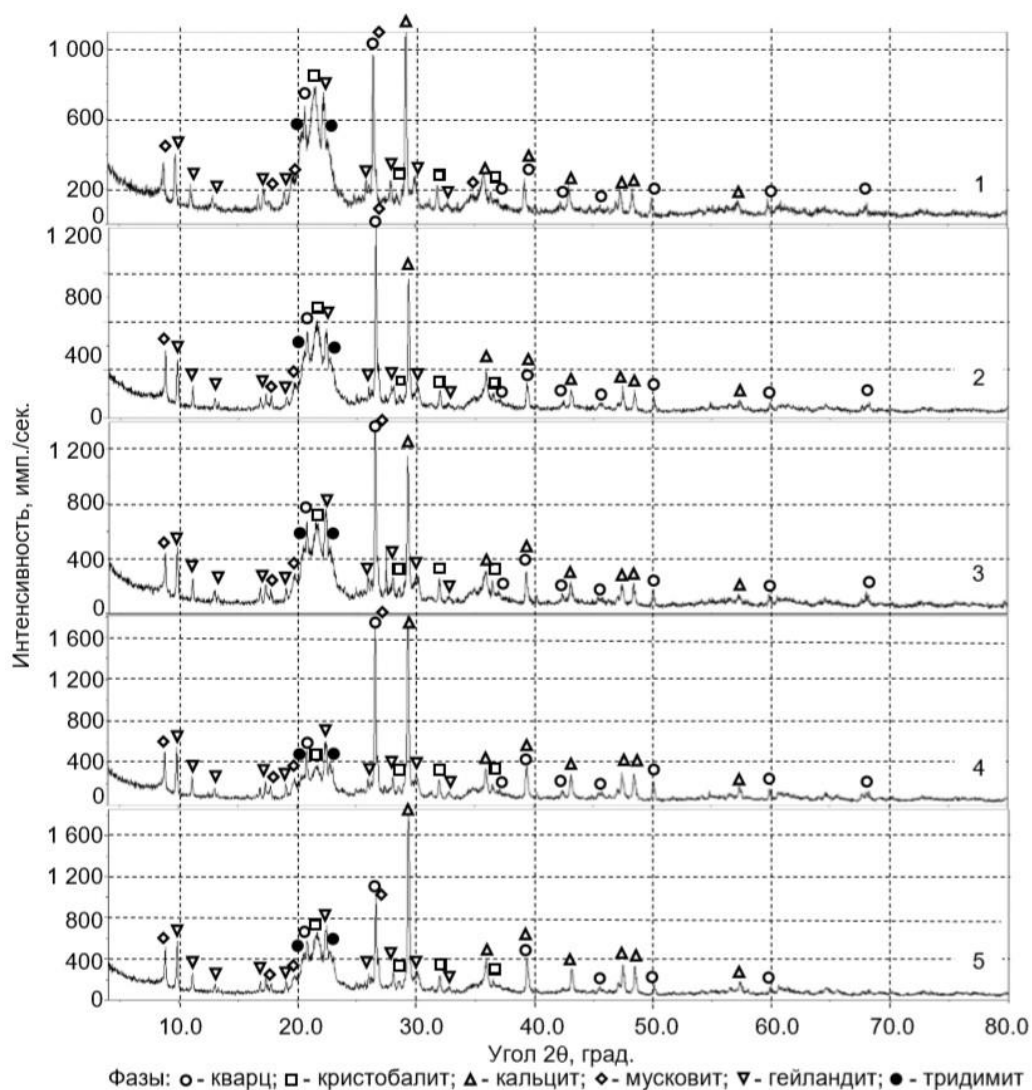


Рис. 1. РФА образцов кремнистых пород: 1-5 – номера составов (таблица 1).

Результаты количественного рентгенофазового анализа кремнистых пород (минералогический состав пород) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Минералогический состав пород

№ состава	Минералогический состав, %						
	Кварц	Кальцит	Гейландит	Мусковит	Кристаллит	Тридимит	Аморфная фаза
1	11,6	12,3	16,8	12,6	24,7	2,0	20,0
2	11,4	12,1	19,0	10,8	24,6	2,1	20,0
3	10,8	12,8	19,2	14,4	21,1	1,7	20,0
4	11,1	22,4	19,8	14,3	11,4	1,0	20,0
5	8,5	21,3	19,6	9,9	19,2	1,5	20,0

По результатам количественного рентгенофазового анализа пород, согласно данным таблицы 3, установлено, что основное отличие в минералогическом составе исследуемых трепелов связано с количественным содержанием кальцита и кристаллита. Пробы № 1-3

отличаются повышенным содержанием кристобалита (более 21,1%). Количество кальцита в составе пород не превышает 12,8 %. Содержание кальцита в трепелах составов № 4 и 5 больше 21,3%, а количество кристобалита уменьшается до 11,4 % (порода № 4). Содержание гейландита (минерал из группы цеолитов) для всех проб находится в пределах 16,8-19,8 %.

Результаты дифференциального термического (ДТА) и дифференциального термогравиметрического (ДТГ) анализов исследуемых кремнистых пород представлены на рисунке 2.

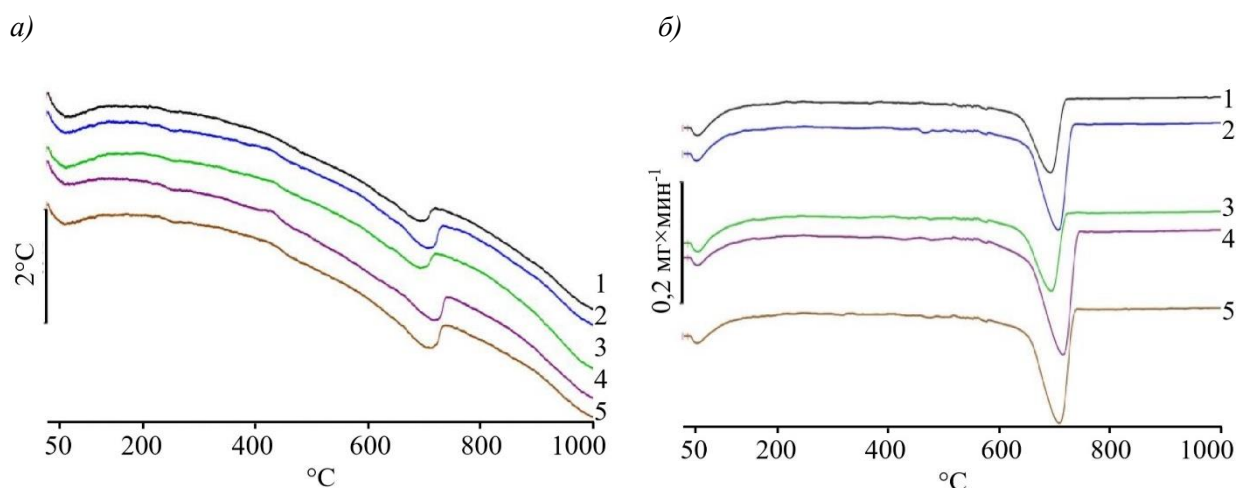


Рис. 2. ДТА (а) и ДТГ (б) кривые кремнистых пород: 1-5 – номера составов (таблица 1).

По данным, представленным на рисунке 2, можно судить о следующих фазовых превращениях, происходящих в кремнистой породе при нагреве. Первый широкий пик в интервале температур от 25 до 120 °С (эндозэффект), независимо от вида породы, соответствует испарению несвязанной воды. Эндотермический эффект с максимумом при температуре ≈ 250 °С и незначительная потеря массы образцом на ДТГ-кривых соответствует дегидратации гейландита. На ДТА-кривых всех составов гейландиту также соответствует экзозэффект при температуре от 400 до 450 °С. Эффект сопровождается незначительными потерями массы образца. Сильный эндотермический эффект на кривых ДТА всех составов и значительная потеря массы образцов в интервале температур от 600 до 750 °С соответствуют наложению эффектов завершения процесса дегидратации гейландита, разложения карбоната кальция и дегидратации мусковита. Широкий экзотермический эффект с максимумом ≈ 900 °С (рис. 2, а) для всех образцов без потери массы соответствует кристаллизации силикатов и алюминатов кальция. Полученные данные о фазовых превращениях, происходящих в исследуемых кремнистых породах при нагреве, подтверждают результаты рентгенофазового анализа.

Имея данные химического и минералогического состава кремнистых пород Енгальчевского проявления Республики Мордовия, определим рациональные области их применения при получении строительных материалов.

В работе [3] установлено, что прочность цементно-песчаных композитов увеличивается более, чем на 35 % при замене 10 % портландцемента цеолитсодержащим трепелом. Химический и минералогический состав использованной в работе породы схож с испытанными нами трепелами составов № 1-3. О целесообразности использования цеолитсодержащих пород Республики Мордовия в качестве активных минеральных добавок для цементов, а также для обогащения клинкера основными окислами говорится также в работе [5].

На основе кремнистых пород с высоким содержанием кальцита получены гранулированные пеностеклокерамические материалы [2]. По ряду показателей полученные материалы превосходят пеностекло. Химический и минералогический состав пород, из которых были получены материалы практически совпадает с составами № 4 и 5. Особенности получения блочных пористых стеклокерамических материалов на основе кремнистых пород, схожих по составу с пробами № 1-3, описаны в работах [6]. Полученные материалы имеют среднюю плотность от 200 до 600 кг/м³, теплопроводность от 0,053 до 0,115 Вт/м·°С, прочность при сжатии от 1,2 до 9,8 МПа, а также обладают повышенной стойкостью к агрессивным воздействиям биологических сред.

В результате проведенных исследований установлено, что основное отличие в химическом составе исследуемых трепелов связано с количественным содержанием SiO₂ и CaO. Количество SiO₂ в исследуемых пробах варьируется от 56,4 до 69,6 %, а количество CaO от 6,8 до 12,5 %. По фазовому составу породы отличаются в большей степени количественным содержанием кальцита и кристобалита. Содержание кальцита в породах варьируется от 12,1 до 22,4 %, а кристобалита от 11,4 до 24,7%. Содержание цеолита (гейландит) для всех проб находится в пределах 16,8 – 19,8 %. Подтверждена целесообразность использования цеолитсодержащего трепела Енгальчевского проявления Республики Мордовия в качестве сырья для получения строительных материалов. Запасы породы проявления составляют около 39 млн. м³. Данная цифра может быть значительно увеличена в случае проведения дополнительной геологоразведки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранова М. Н., Коренькова С. Ф., Чумаченко Н. Г. История освоения кремнистых пород // Строительные материалы. – 2011. – № 8. – С. 4-7.
2. Kazantseva L. K., Lygina T. Z., Rashchenko S. V., Tsyplakov D. S. Preparation of Sound-Insulating Lightweight Ceramics from Aluminosilicate Rocks with High CaCO₃ Content // Journal of the American Ceramic Society. – 2015. – Vol. 98(7). – P. 2047-2051.
3. Ерофеев В. Т., Родин А. И., Бикбаев Р. Р., Пиксайкина А. А. Исследование свойств портландцементов с активной минеральной добавкой на основе трепела // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3. – С. 7-17.
4. Чернова Г. Р., Зоря В. П., Орехов С. Р. Отчет по поискам и поисково-оценочным работам на цеолиты в восточных районах Мордовии, выполненным Центральной ГГЭ в 1993-2002 гг. – Неклюдово, 2002. – 355 с.
5. Селяев В. П., Ямашкин А. А., Куприяшкина Л. И., Неверов В. А., Селяев П. В. Минерально-сырьевая база строительной отрасли Мордовии: учеб. пособие. Ч. 2: Карбонатные и кремнийсодержащие породы. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. – 140 с.
6. Ерофеев В. Т., Родин А. И., Кравчук А. С., Казначеев С. В., Захарова Е. А. Биостойкие пеноситаллы на основе кремнеземсодержащих пород // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 8(84). – С. 48-56.

КУПРИЯШКИНА Л. И., РОДЬКИНА Д. А., УСАНОВА Е. Ю., ЕРМОЛАЕВ В.В.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

Аннотация. Рассмотрены методы получения микрокремнезема, широко применяемого в различных отраслях промышленности. Выявлены недостатки методов и пути их устранения. Для синтеза высококачественного микрокремнезема в качестве осадителя кремниевой кислоты из щелочного раствора предложено использовать концентрированную азотную кислоту.

Ключевые слова: диатомит, микрокремнезем, модификация, кислота, щелочь, термическая обработка, химический анализ, осадок, фильтрат.

KUPRYASHKINA L. I., RODKINA D. A., USANOVA E. Y., YERMOLAEV V. V.

OBTAINING HIGH-QUALITY MICROSILICA

Abstract. The methods of obtaining microsilica, widely used in various industries, are considered. Shortcomings of the methods and ways of their improving are revealed. For the synthesis of high-quality microsilica the authors suggest using concentrated nitric acid as a precipitator of silicic acid from an alkaline solution.

Key words: diatomite, microsilica, modification, acid, alkali, heat treatment, chemical analysis, sediment, filtrate.

Диоксид кремния – вещество широкого применения, которое необходимо для приготовления биоцидных, огнестойких тканей, особо «чистого» увиолевого стекла, высокопрочных бетонов, теплоизоляционных материалов, керамики, огнеупоров, резины, волоконно-оптического кабеля, а также в пищевой (добавка Е 551), фармацевтической и текстильной отрасли. В настоящее время наблюдается значительный рост потребления аморфных кремнеземов в мировой промышленности. Помимо традиционного их использования в качестве добавок в резину, пластмассу, бумаги, для изготовления клеев, жидкого стекла, керамики, адсорбентов и т. д. значительно увеличивается потребление нанодисперсного химически чистого аморфного кремнезема в высокотехнологичных отраслях промышленности. В качестве исходного материала для его получения в нашей стране служит кремнеземсодержащее сырье, к которому относятся диатомиты, трепел и опока. Эти породы на 60–80 % по массе состоят из различных модификаций диоксида кремния. Сырьевой базой кремнеземсодержащего сырья для получения кремнезема в Республике Мордовия могут служить два месторождения диатомита – Атемарское и Анучинское с суммарными запасами 21106 тыс. м³ [1].

На основе переработки фторидных отходов, которые образуются в результате вскрытия титанокремниевое концентрата плавиковой кислотой с получением раствора, содержащего кремний в виде фторидных соединений, можно получить диоксид кремния [2]. При использовании фторидных соединений, которые являются агрессивными продуктами, возникает необходимость применять дорогостоящие материалы, а также создавать повышенные меры безопасности для обслуживающего технический процесс персонала, что ведет к существенному повышению себестоимости диоксида кремния.

Известен способ получения диоксида кремния, получаемого карбонизацией жидкого стекла углекислым газом. Процесс карбонизации ведут до достижения pH 9–10,5. Полученную суспензию подвергают гидродинамической активации, затем суспензию нейтрализуют серной кислотой до pH 5,0–8,5 с выдержкой в реакторе, промывают горячей водой и подвергают распылительной сушке [3]. Но многооперационность, использование для нейтрализации серной кислоты, а затем образование сернокислых стоков, которые являются целевым технологическим продуктом, приводит к удорожанию, усложняет аппаратное оформление и не решает экологические задачи.

При получении диоксида кремния путем сжигания четыреххлористого кремния в потоке кислорода и водорода требуются большие энергозатраты и серьезные меры по обеспечению взрывобезопасности. При обработке мелкодисперсной кремнийсодержащей пыли газоочистки электротермического производства кремния и кремнистых ферросплавов получается недостаточно чистый микрокремнезем, поэтому необходимы дополнительные затраты по очистке продукта. Способы получения диоксида кремния высокой чистоты из рисовой шелухи недостаточно рациональны и экологически небезопасны, либо требуют сложных и дорогостоящих систем очистки.

При растворении силиката натрия в автоклаве в воде под избыточным давлением 0,57–0,59 МПа, с обработкой раствора газовой смесью, содержащей углекислый газ, можно получить высокодисперсного диоксида кремния, но недостаточно высокого качества [4].

Авторским коллективом был рассмотрен метод получения микрокремнезема путем синтеза аморфного кремнезема из прокаленного диатомита действием щелочи [5]. Однако недостаток данного метода заключается в том, что предложенный способ получения кремнезема является трудоемким, длительным и позволяет получать небольшие количества конечного продукта. При низких значениях pH происходят потери кремнезема за счет перехода кремниевой кислоты в истинно-растворимое состояние. Поэтому коллоидно-растворенную кремниевую кислоту необходимо дегидратировать и коагулировать, истинно-растворенную – полимеризировать и дегидратировать. Для уменьшения потерь кремниевой кислоты проводят повторные операции с фильтратом (выпаривание) или введение раствора

желатина. После осаждения кремниевой кислоты концентрированной HCl в фильтрате установлены высокое содержание хлорид-ионов. В этих условиях возможна сорбция хлорид-ионов кремниевой кислотой. Для удаления хлорид-ионов из осадка требуется длительное промывание его горячей водой, подкисленной HNO₃ [6].

Поэтому необходимо разработать метод, который позволит экономить время на промывание осадка водой для удаления хлорид-ионов, увеличить выход продукта и получить более чистый микрокремнезем с минимальным содержанием примесей.

Известно [1], что природный диатомит необходимо предварительно прокаливать, так как при прокаливании, прежде всего, происходит удаление адсорбционной воды (в интервале температур 100 ÷ 300 °C), затем поровой воды (300 ÷ 400 °C) с последующим выгоранием органических веществ при температуре выше 400 °C. Уже при температуре 500 °C и более в диатомите возможен фазовый переход β -кварца в α -кварц.

Время прокаливания, как правило, составляет от 30 до 120 минут, так как продолжительность тепловой обработки диатомита более 2 часов может привести к разложению минеральных составляющих. В представленной работе термообработка диатомита осуществлялась при: 100, 200, 300, 400, 500, 600 °C в муфельной печи в алундовых и корундовых тиглях. В процессе прокаливания наблюдалось изменение цвета породы от серой до красно-бурой. Химический состав природного диатомита в зависимости от времени прокаливания при стабильной температуре (T = 500 °C) представлен в таблице 1.

Таблица 1

Элементный состав природного диатомита в зависимости от времени прокаливания по данным рентгенофлуоресцентного анализа (T = 500 °C)

№ п/п	t, мин	Элементный состав W, %							
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃
1	30	88,51	3,45	4,17	1,25	0,387	0,358	0,159	0,0267
2	60	88,11	3,81	4,08	1,31	0,418	0,335	0,150	0,0513
3	90	89,18	2,93	4,13	0,913	0,426	0,380	0,196	0,0313
4	120	87,13	4,07	4,18	1,48	0,466	0,430	0,224	0,0540

Из таблицы 1 видно, что химический состав диатомита при стабильной температуре (500 °C) практически не зависит от времени прокаливания. Содержание кремнезёма SiO₂ составляет около 88%.

После термической обработки измельченный и прокаленный диатомит отвешивали на технических весах, помещали в коническую колбу на 500–750 мл, добавляли 350 мл раствора NaOH различной концентрации: 10, 20, 30%, накрывали часовым стеклом и выдерживали в

термостате при температуре 90 °С в течение 2 часов, периодически перемешивая. Соотношение Ж:Т фаз составляло 6:1 – 14:1.

Для поддержания температуры в работе использовали криотермостат жидкостной ТЖ-ТС-01/16К-40. По истечении времени горячий раствор фильтровали через неплотный фильтр. Из полученного фильтрата осаждали кремниевую кислоту HNO_3 . Кислоту добавляли медленно, при перемешивании до кислой реакции раствора (рН 1–2). Раствор упаривали досуха в термостойком стакане на водяной или песчаной бане. Сухой остаток обрабатывали 2–3 раза небольшими порциями концентрированной HNO_3 для обезвоживания гидратированного диоксида кремния (IV). Затем добавляли 200–250 мл горячей дистиллированной воды и продолжали нагревать на водяной бане до полного растворения солей. Нерастворимым оставался только гидратированный оксид кремния (IV) в виде хлопьевидной массы. После выдерживания осадок отфильтровывали через неплотный беззольный фильтр и промывали на фильтре до отрицательной реакции на ион железа (III) с роданидом. Осадок подсушивали на фильтре, затем переносили в чашку Петри и сушили при 100–160 °С в сушильном шкафу до постоянной массы. Выход аморфного кремнезёма в зависимости от концентрации щелочи и температуры прокаливания представлен в таблице 2.

Таблица 2

Выход аморфного кремнезема из прокаленного диатомита в зависимости от концентрации щелочи (температура термостатирования 90 °С, $\tau = 2$ ч)

№ п/п	Т, °С	Конц. NaOH, %	Диатомит	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, г	Выход, %	Соотношение Ж:Т
Осадитель – концентрированная HNO_3						
1	500	10	25,0	12,10	48,4	14:1
2		20	25,0	17,30	69,2	14:1
3		30	25,0	21,81	87,2	14:1

Выход аморфного кремнезёма зависит от температуры прокаливания, концентрации щелочи, соотношения Ж:Т и природы кислоты, которой проводилось осаждение. Наибольший выход кремнезёма получен при использовании 30% NaOH, температуры прокаливания 500 °С, соотношения Ж:Т 14:1, осадитель – концентрированная HNO_3 выход составил 87,2% (табл. 2).

Результат химического анализа порошков синтезированного кремнезема показали (табл. 3), что они состоят на 95,36 ÷ 99,13% из диоксида SiO_2 . Основными примесями являются Na_2O . Оксиды железа, алюминия, кальция, калия, титана содержатся в небольших количествах, которые можно отнести к микрокомпонентам.

Таблица 3

Элементный состав порошка аморфного кремнезема, синтезированного из прокаленного диатомита ($\tau = 2$ ч), в зависимости от концентрации NaOH по данным рентгенофлуоресцентного анализа

№ п/п	T, °C	Конц. NaOH, %	SiO ₂	Na ₂ O	Cl ⁻	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂
Элементный состав W, %										
Осадитель – концентрированная HNO ₃										
1	500	10	99,13	0,48	-	0,134	0,0373	-	0,0113	0,0067
2		20	97,13	1,14	-	0,175	0,181	0,567	0,0244	0,0152
3		30	95,36	2,05	-	0,176	0,426	1,84	0,0251	0,0373

Примесь хлорида натрия в процессе синтеза его из раствора гидроксида натрия и выделения кремниевой кислоты хлористоводородной кислотой сорбируется на поверхности аморфного кремнезема. NaCl можно удалить обильным промыванием водой. Химический состав синтезированного кремнезёма практически не зависит от температуры прокаливания, но зависит от концентрации щелочи. С увеличением концентрации щелочи уменьшается процентное содержание SiO₂ в связи с увеличением содержания оксида алюминия.

Фильтрат, полученный после отделения синтезированного кремнезёма и промывания его горячей водой, анализировали на содержание оксида кремния (IV), хлорид-ионов, ионов железа (III) и pH. Результаты анализа свидетельствуют, что после выделения кремниевой кислоты концентрированной HNO₃, pH фильтрата равен ~1, что является важным условием получения тонкодисперсного кремнезёма. Фильтрат должен быть непременно кислым (pH 1–2); при этом возможно повышение растворимости кремниевой кислоты.

После осаждения кремниевой кислоты концентрированной HCl в фильтрате установлено высокое содержание хлорид-ионов. В этих условиях возможна сорбция хлорид-ионов кремниевой кислотой. Для удаления хлорид-ионов из осадка требуется длительное промывание его горячей водой, подкисленной HNO₃.

С целью экономии времени на промывание осадка водой для удаления хлорид-ионов удобнее в качестве осадителя кремниевой кислоты из щелочного раствора использовать концентрированную HNO₃. Содержание хлорид-ионов в фильтрате в этом случае минимально

Предложенный метод отличается тем, что:

1) в качестве осадителя вместо концентрированного раствора HCl был использован раствор концентрированного HNO₃;

2) для удаления хлорид-ионов из осадка не требуется длительное промывание его горячей водой, подкисленной HNO₃, так как содержание хлорид-ионов в фильтрате в этом случае минимально;

3) увеличивается выход аморфного микрокремнезема (он составляет 87,2 %).

4) получается более чистый микрокремнезем, с минимальным содержанием примесей (результат химического анализа порошка синтезированного кремнезема составляет $95,36 \div 99,13 \%$ SiO_2);

На основании технического результата был выдан патент на разработку высококачественного микрокремнезема из природного диатомита осаждением раствора азотной кислоты [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карандашов Д. Л., Куприяшкина Л. И., Мещеряков А. Е., Муханов М. А., Нурлыбаев Р. Е. Атемарский диатомит как сырье для получения микрокремнезема [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2019. – №5. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/atemarskij-diatomit-kak-syre-dlya-polucheniya-mikrokremnezema> (дата обращения 25.03.2021).
2. Патент 22625544 Российская Федерация, МПК С 22 В 34/12. Способ переработки кварц-лейкоксенового концентрата / М. П. Федун, В. К. Баканов, В. В. Пастихин, Л. Б. Чистов; патентообладатели: Федун Марина Петровна (RU), Баканов Виталий Константинович (RU), Пастихин Валерий Васильевич (RU), Чистов Леонид Борисович (RU). – № 2004115726/02; заявл. 26.05.2004; опубл. 20.10.2005. Бюл. № 29.
3. Патент 2023664 Российская Федерация, МПК C01B 33/18. Способ получения осажденного кремнеземного наполнителя / В. В. Деревянко, В. Ф. Соболев, Е. П. Попляков, Ю. Н. Зверев, В. М. Балабанов; патентообладатель Соболев Валентин Федорович. – № 5019457/26; заявл. 23.09.1991; опубл. 30.11.1994. Бюл. № 24.
4. Патент 2625114 Российская Федерация, МПК С 01 В 33/18. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема золь-гель методом / В. П. Селяев, А. А. Седова, Л. И. Куприяшкина, А. К. Осипов, П. В. Селяев; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – № 2016115956; заявл. 22.04.2016; опубл. 11.07.17. Бюл. № 20.
5. Патент 2156734 Российская Федерация, МПК С 01 В 33/18 Способ получения белой сажи / Г. А. Дружбин, Н. И. Карапира, И. О. Кузнецов, В. И. Чудновцев; патентообладатель Кузнецов Игорь Олегович. – № 2000107665/12; заявл. 30.03.2000; опубл. 27.09.2000. Бюл. № 27.

6. Патент 2526454 Российская Федерация, МПК С 01 В 33/18. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема / В. П. Селяев, А. К. Осипов, А. А. Седова, Л. И. Куприяшкина; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – № 2013104054/05; заявл. 30.01.13; опубл. 20.08.14. Бюл. № 23.
7. Патент 2740995 Российская Федерация, МПК 51 С01В 33/18, С01В 33/193. 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; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – № 2020116983; заявл. 22.05.2020; опубл. 22.01.2021. Бюл. № 3.

КОРОТИН А. И., ЛАЗАРЕВ А. Л., БРОДЯГИНА Т. В., КОРОТИН М. А.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
СОВРЕМЕННЫХ МУСОРОСЖИГАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. В работе приведен анализ современного производства металлических конструкций и оборудования для мусоросжигающих заводов. Проанализирован процесс наплавки при изготовлении газоплотных панелей.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, «зеленая» энергетика, термическая переработка отходов, металлические конструкции каркаса, сплав Инконель 625 (Inconel 625), технология Cold Metal Transfer (холодный перенос металла), дуговая однослойная механизированная наплавка, циркуляционная экономика.

KOROTIN A. I., LAZAREV A. L., BRODYAGINA T. V., KOROTIN M. A.
IMPROVING RELIABILITY OF BASIC STRUCTURES
IN MODERN WASTE INCINERATION COMPLEXES

Abstract. The paper presents an analysis of the modern production of metal structures and equipment for waste incineration plants. The process of surfacing in the manufacture of gas-tight panels is analyzed.

Key words: solid household waste, "green" energy, thermal waste processing, metal frame structures, Inconel 625 alloy, Cold Metal Transfer technology, arc single-layer mechanized surfacing, surfacing thickness, surfaced layer, circulation economy.

В настоящее время в России задачей государственной важности является обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия нации, поэтому огромную значимость приобретает проблема утилизации и переработки твердых бытовых отходов, на решение которой направлено одно из пяти направлений национального проекта «Экология» [1]. Данная проблема имеет множество аспектов: социальных, экологических, технических, технологических и др., поэтому ее решение должно быть комплексным и универсальным. Решением проблемы утилизации отходов специалисты занимаются с 80-х годов прошлого века. В Советском Союзе 29 июня 1987 г. были утверждены «Рекомендации по проектированию и эксплуатации заводов по сжиганию твердых бытовых отходов» [2]. Однако, до практической реализации решения проблемы утилизации отходов в России в конце 20-го и начале 21-го века так и не дошло. При этом следует отметить, что в других странах научные изыскания и практические разработки проводились все это время и были достигнуты значительные успехи в реализации данного направления. Экспериментальные исследования в этой области показали, что основной проблемой при сжигании твердых бытовых отходов

(ТБО) является образование очень токсичной газовой среды, состоящей в основном из диоксинов и фуранов, синтез которых происходит непосредственно в термическом реакторе в присутствии хлора и органических веществ, которые в избытке содержат ТБО в виде остатков изделий из поливинилхлорида, электроизолирующих изделий, смазочных материалов и т.д. Эти вещества даже в относительно малых концентрациях поражают практически все живые организмы – от бактерий до человека. Обладая очень высокой химической стойкостью, они не разлагаются в окружающей среде десятки лет, накапливаются в верхних слоях почвы и попадают в организм человека с пищей, водой и воздухом.

В рамках приоритетного проекта «Чистая страна» в России начато строительство нескольких мусоросжигающих заводов (МСЗ), что является реальной и очень важной составной частью создания будущей «зеленой» энергетики, где техногенные отходы являются возобновляемым источником энергии. Таким образом строительство предприятий по термической переработке отходов представляется очень перспективным и актуальным.

Для реализации данного направления в России на ПАО «Машиностроительный завод «ЗИО-Подольск» было развернуто производство основного оборудования для строительства заводов по термической переработке твердых коммунальных отходов, которые будут превращать мусор в полезную энергию. Оборудование состоит из несущих металлических конструкций каркаса и конструкций котлов, включающих в себя теплообменное оборудование, инсинератор, паровой котел с газоплотными панелями, трубопроводы, нагревательные элементы и вспомогательные металлоконструкции. Общий объем металлоконструкций комплекса по термической переработке отходов составляет более 1000 т, поэтому для оптимизации процесса изготовления и монтажа необходима интенсивная совместная работа конструкторов, проектировщиков, поставщиков технологии, подрядных организаций, металлистов-технологов и других узких специалистов. Проектирование должно выполняться в соответствии с СП 89.13330.2016 «Котельные установки. Актуализированная редакция. СНиП II-35-76» [3]. Расчет элементов металлического каркаса выполняется с применением прикладного пакета программ Tekla Structures [4]. Расчетная модель конструкций мусоросжигающего завода представлена на рисунке 1.

Заводы по переработке отходов будут строиться на основе технологии японско-швейцарской компании Hitachi Zosen INOVA. На текущий момент это одна из самых референтных технологий с жесткими требованиями к экологическим параметрам работы оборудования. Данная технология переработки отходов предусматривает полное разложение вредных веществ на молекулы, включая органические загрязнители, что позволяет минимизировать количество вредных веществ уже на выходе из котла [5]. Принципиальная

схема мусоросжигательного комплекса и его основных конструкций представлена на рисунке 2.

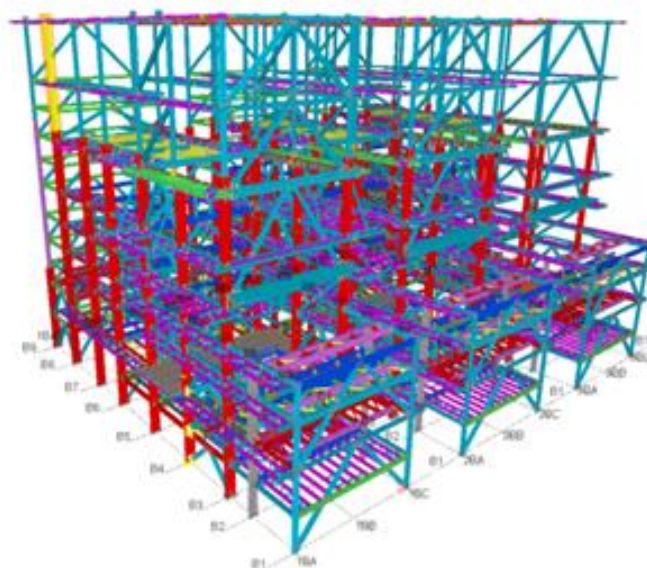


Рис. 1. Расчетная модель несущих конструкций металлического каркаса мусоросжигательного завода [4].

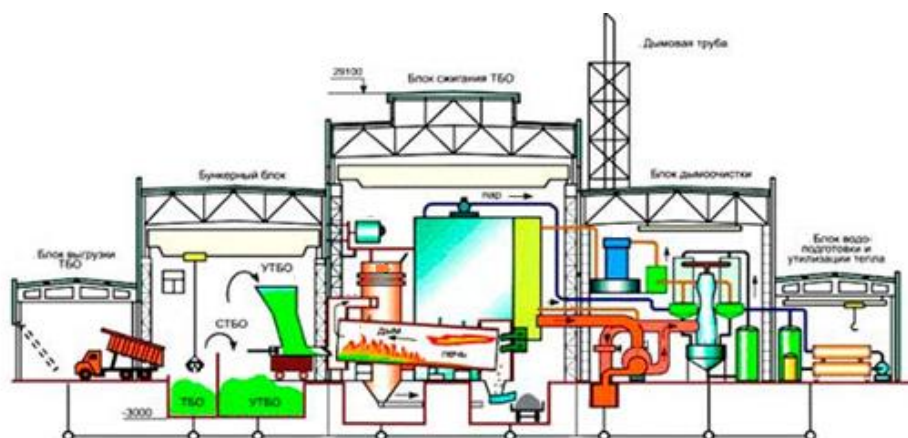


Рис. 2. Принципиальная схема мусоросжигательного комплекса [1].

При температуре свыше 1200°C сложные полимерные соединения распадаются на простые вещества: кислород, углерод и хлор, а полученное при сжигании ТБО тепло нагревает пар, получаемый в котле, который затем идет в турбогенератор, вырабатывающий электроэнергию. Для производства электроэнергии предполагается использовать котел П-152. Мощность ТЭЦ достаточно велика. Непосредственно на нужды завода расходуется не более 10% от вырабатываемого электричества. Остальная энергия поставляется потребителям. После турбины пар конденсируется и возвращается в котел; система работает в закрытом цикле.

Металлический каркас мусоросжигательного комплекса состоит из 18 основных вертикальных колонн и горизонтальных ригелей, расположенных в семи уровнях. Высота

каркаса по верхней отметке составляет 39,8 м, ширина по осям колонн – 13 м, глубина по осям колонн – 47,15 м. Общий вес каркаса котла более 18 тонн. Каркас, представленный на рисунке 3, предназначен для установки основных и вспомогательных элементов мусоросжигательного комплекса.



Рис. 3. Металлический каркас мусоросжигательного комплекса [2].

Главным элементом мусоросжигающего комплекса является энергетическая котельная установка для сжигания мусора, представленный на рисунке 4.



Рис. 4. Изготовление энергетической котельной установки [8]

Условия эксплуатации мусоросжигательного комплекса, особенно энергетической котельной установки, предъявляют очень жесткие требования к металлическим элементам и конструкциям, расположенным в горячей зоне, где происходят основные процессы сгорания и термического разложения твердых бытовых отходов. Для обеспечения требуемой долговечности рабочих поверхностей, и, главным образом, рабочего слоя, наносимого на поверхность газоплотной панели котла, предъявляются очень жесткие требования –

наплавленный слой должен обладать длительной прочностью и коррозионной стойкостью при температурах выше 1250 °С; толщина наплавленного слоя должна быть 2 – 4 мм и содержание ферритной фазы в наплавленном металле не должно превышать 5%.

В соответствие с современными тенденциями, элементы газоплотных панелей изготавливаются из низколегированной стали 12Х1МФ и наплавляемого на них жаропрочного сплава на основе хрома (Cr) Инконель 625 (Inconel 625), который обладает высокой прочностью и коррозионной стойкостью при высоких температурах. Из-за высокой устойчивости в агрессивных средах Инконель 625 широко используется при изготовлении специальных металлических конструкций во многих областях промышленности, в том числе в нефтехимической промышленности и в тепловой энергетике при производстве электроэнергии. Исходя из этого, целесообразно применить данный металлический сплав при производстве основной рабочей поверхности газоплотной панели энергетического котла МСЗ. Механическая прочность сплава Инконель 625 при повышенных температурах обусловлена высоким содержанием Cr и наличием других легирующих элементов (Mo, Nb, Fe), которые образуют твердые растворы в никель-хромовой матрице. Повышение прочности сплава происходит из-за образования карбидов и интерметаллидов, например $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$ или $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Al}, \text{Ti})$, при старении в диапазоне температур 550 – 750 °С

На Подольском заводе запущена в работу высокотехнологичная линия наплавки на рабочую поверхность специального слоя из никелевого сплава Инконель 625 по технологии Cold Metal Transfer (холодный перенос металла) что обеспечивает высокую производительность, защиту от химической коррозии при высоких температурах, которым оно будет подвергаться в процессе работы [6]. Процесс Cold Metal Transfer (CMT) представляет собой дуговую однослойной механизированной наплавку с импульсной подачей сплошной проволокой с возвратно-поступательным движением проволоки в защитном газе. Процесс наплавки ведется сверху-вниз с углом наклона сварочной горелки вверх 75 – 85°, что предотвращает стекание металла сварочной ванны и обеспечивает минимальное перемешивание наплавленного металла с основным материалом газоплотной панели. Давление дуги поддерживает сварочную ванну на вертикальной плоскости и позволяет обеспечивать заданную толщину наплавки от 2 до 4 мм [7]. Возможная частота колебаний проволоки во время CMT – до 130 Гц.

Технология наплавки выполняется последовательно наплавляемыми слоями с перекрытием предыдущего слоя на 2 – 5 мм по схеме, представленной на рис. 5. Во время наплавки производится постоянное замкнутое водяное охлаждение внутри труб с помощью термостата, который поддерживает температуру охлаждающей жидкости в пределах 25 – 30 °С. Вода в установке движется по двум контурам. Контур охлаждения детали: бак

накопитель, насос, трубы газоплотной панели. Контур охлаждения воды: бак накопитель, насос, «чиллер» (устройство охлаждения воды и автоматического поддержания температуры). На рисунке 6 представлен процесс наплавки газоплотных панелей жаропрочным сплавом Инконель 625 с СМТ-переносом на установках FRONIUS, на рисунке 7 – наплавленные слои валиков под №№ 1-3, а на рисунке 8 – наплавленный слой на газоплотной панели [8].

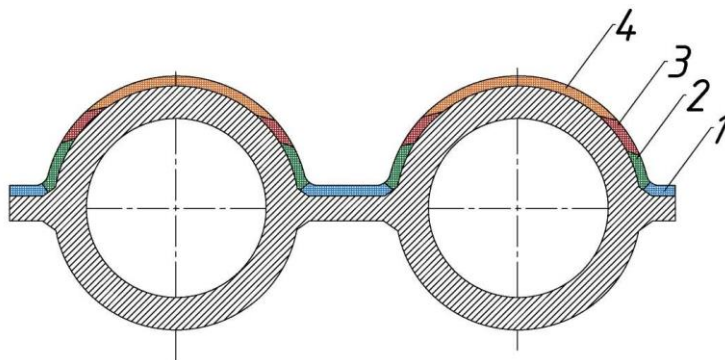


Рис. 5. Последовательность наложения валиков при наплавке на трубную панель нагрева:
1, 2, 3, 4 – номера слоев.



Рис. 6. Наплавка газоплотных панелей с СМТ-переносом.

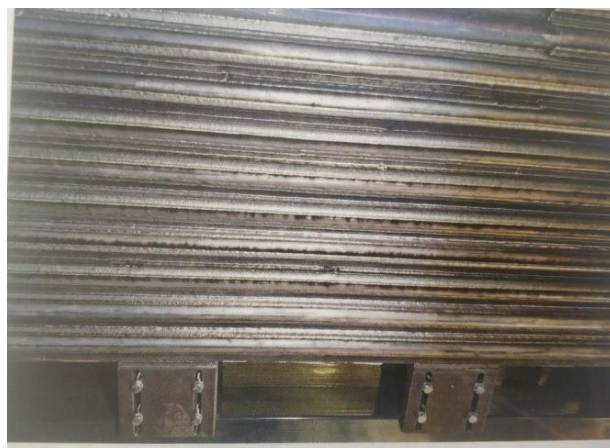


Рис. 7. Наплавленный слой после наложения валиков №№ 1 – 3.

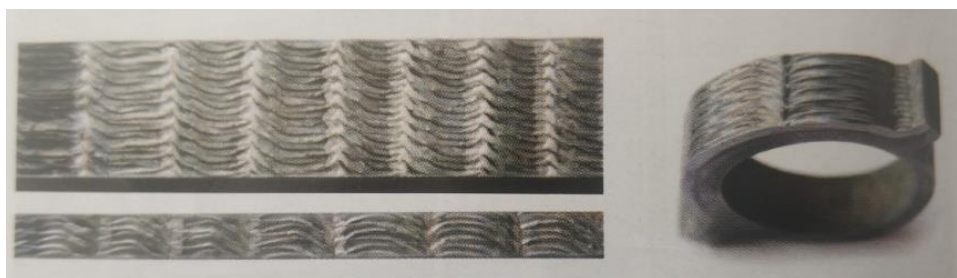


Рис. 8. Наплавленный слой газоплотной панели.

Предлагаемая технология однослойной наплавки жаропрочного сплава значительно повышает срок эксплуатации котлов мусоросжигающих заводов, предназначенных для утилизации отходов, улучшает их качество и позволяет обеспечить требуемые темпы строительства предприятий по переработки бытовых отходов в электроэнергию и необходимую экологическую безопасность на территории строительства и функционирования данных предприятий и прилегающих к ним территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сираджинов Р. Ж. Экология как поле разрешения конфликта интересов // Муниципальная академия. – 2017. – №4. – С. 187–190.
2. Рекомендации по проектированию и эксплуатации заводов по сжиганию твердых бытовых отходов. – М.: АКХ им. К.Д. Панфилова, 1987. – 36 с.
3. СП 89.13330.2016 «Котельные установки. Актуализированная редакция. СНиП II-35-76». – М., 2012. – 68 с.
4. Tekla Structures [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tekla.com/ru/Продукция/tekla-structures> (дата обращения 10.02.2021).
5. Арустамов Э. А., Косолапова Н. В., Прокопенко Н. А., Гуськов Г. В. Безопасность жизнедеятельности. – 12-е изд. – М.: Академия, 2017. – 174 с.
6. CMT: Cold Metal Transfer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.digitalweldingsolutions.com/CMT.pdf> (дата обращения 10.02.2021).
7. Гладков Э. А., Бродягин В. Н., Перковский Р. А. Автоматизация сварочный процессов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 421 с.
8. Гладков Э. А., Бродягина Т. В., Евсиков Ф. К. Автоматизированная наплавка поверхностей нагрева мусоросжигающих котлов // Сварка и диагностика. – 2019. – №4. – С. 58–61.

РИМШИН В. И., ЕРЫШЕВ В. А., ГУРЬЯНОВА А. В.

ИННОВАЦИОННЫЕ АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Аннотация. В данном обзоре представлен ряд изобретений, относящийся к области атомной электроэнергетики и касающийся создания атомных электрических станций, их компоновки и защищённости, а также снижения последствий в различных аварийных ситуациях или предотвращения аварийных ситуаций. Все рассматриваемые технические решения и рисунки являются частью изобретений, на которые получены патенты, удостоверяющий новизну, исключительное право, авторство и приоритет изобретения в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации.

Ключевые слова: строительство, АЭС, атомная электрическая станция, конструктивное решение, патент.

RIMSHIN V. I., ERY SHEV V. A., GURYANOVA A. V.

INNOVATIVE NUCLEAR POWER STATIONS

Abstract. This review presents some inventions in the field of nuclear power generation that are related to the creation of nuclear power stations, their configuration and security as well as the reduction of the consequences in various emergency situations or the prevention of these situations. All of the considered technical solutions and drawings are part of the inventions that have patents, which certify the novelty, exclusivity, authorship and priority of the inventions by the current legislation of the Russian Federation.

Key words: construction, nuclear power stations, constructive solution, patent.

Строительство атомной электрической станции (АЭС) – сложный технологический вопрос, требующий профессионального подхода к выбору количества используемых энергоблоков, расчёту занимаемой площади, способу размещения конкретной АЭС, защите станции и других, не менее важных, составляющих.

В БД РИНЦ представлено 8 изобретений с названием «Атомная электрическая станция», разработанных как отдельными исследователями, так и авторскими коллективами. Задача данного патентного обзора состоит в рассмотрении ряда патентов с целью краткого изложения формулы изобретения каждого из них.

1. Атомная электрическая станция

(авторское свидетельство SU 1828710 АЗ [1], 30.12.1994 г.)

Сущность изобретения: ядерный реактор с парогенераторами снабжен гидравлической турбиной с электрическим генератором и установлен под землей на заданном нижнем геодезическом уровне. Водяной пар с парогенераторов подается по термостатированному

паропроводу на паровую турбину с электрическим генератором, которая установлена на существенно более высоком геодезическом уровне по сравнению с нижним уровнем, а отработавшие вода и сконденсированный пар после паровой турбины по водоводу-трубопроводу подаются на гидравлическую турбину и далее снова на парогенераторы ядерного реактора.

Цель изобретения – повышение безопасности работы станции.

Изобретение поясняется чертежом (см. рис. 1), где показана технологическая схема предлагаемой атомной электростанции с подземным размещением ядерной реакторной установки, где 1 – ствол атомной электрической станции; 2 – подземная камера; 3 – ядерный реактор; 4 – защитная оболочка реактора; 5 – устройство сжигания гремучего газа и вентиляции ядерного реактора; 6 – трубопровод (канал) для выдачи продуктов вентиляции на поверхность; 7 – установка тонкой очистки и нейтрализации продуктов вентиляции реактора; 8 – дутьевой вентилятор; 9 – вентиляционная труба и циркуляционная труба; 10 – циркуляционный насос второго контура ядерного реактора; 11 – парогенератор; 12 – термостатированный паропровод; 13 – паровая турбина с электрическим генератором 14; 15 – блок-накопитель; 16 – конденсатор; 17 – циркуляционный насос; 18 – пруд-охладитель; 19 и 20 – поверхностные питающие насосы; 21 – трубопровод-водовод; 22 – гидроагрегатная камера; 23 – гидравлическая турбина с электрическим генератором 24; 25 – накопительный резервуар; питающие трубопровод 26 и насос 27.

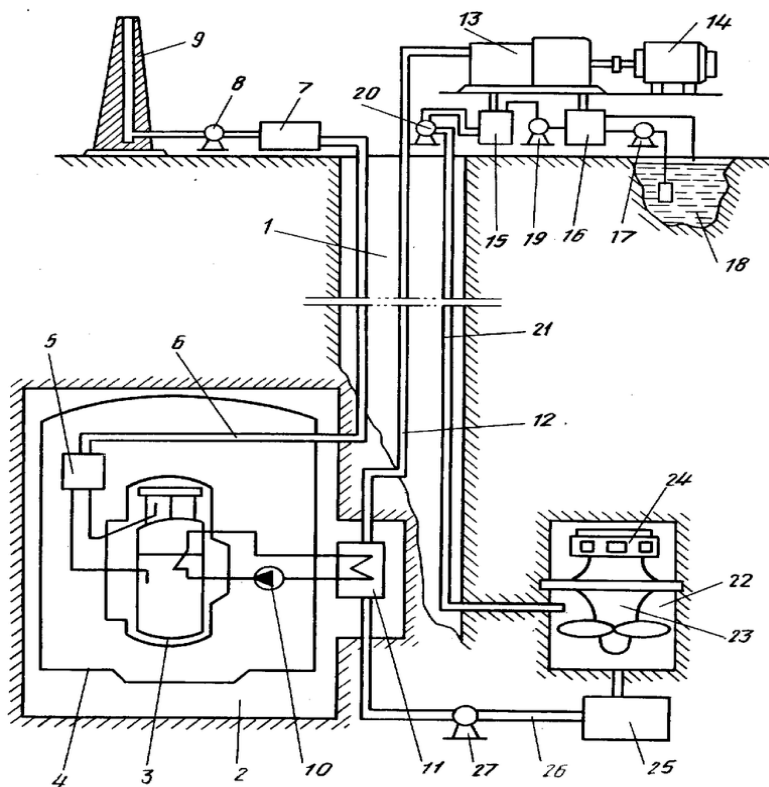


Рис. 1. Технологическая схема атомной электростанции.
(авторское свидетельство SU 1828710 A3 [1])

2. Атомная электрическая станция.

(патент на полезную модель RU 147663 U1 [2], 10.11.2014 г.)

Задачей полезной модели является повышение КПД атомной электростанции, за счет повышения надежности и эффективности работы паровой турбины при номинальных нагрузках и снижения теплового загрязнения окружающей среды.

Поставленная задача достигается за счет того, что атомная электрическая станция последовательно содержит (см. рис. 2) паровую турбину (1), сепаратор-пароперегреватель (2), абсорбционный тепловой насос (3), теплообменник-конденсатор абсорбционного теплового насоса (4), теплообменник-испаритель абсорбционного теплового насоса (5), конденсатор паровой турбины (6), конденсатный насос (7), подогреватели низкого давления (8), деаэратор (9), питательный насос (10), подогреватели высокого давления (11), парогенератор (12), при этом теплообменник-испаритель абсорбционного теплового насоса расположен на подающих и отводящих трубопроводах охлаждающей воды конденсатора паровой турбины, а теплообменник-конденсатор абсорбционного теплового насоса выполнен в едином корпусе с цилиндром низкого давления паровой турбины.

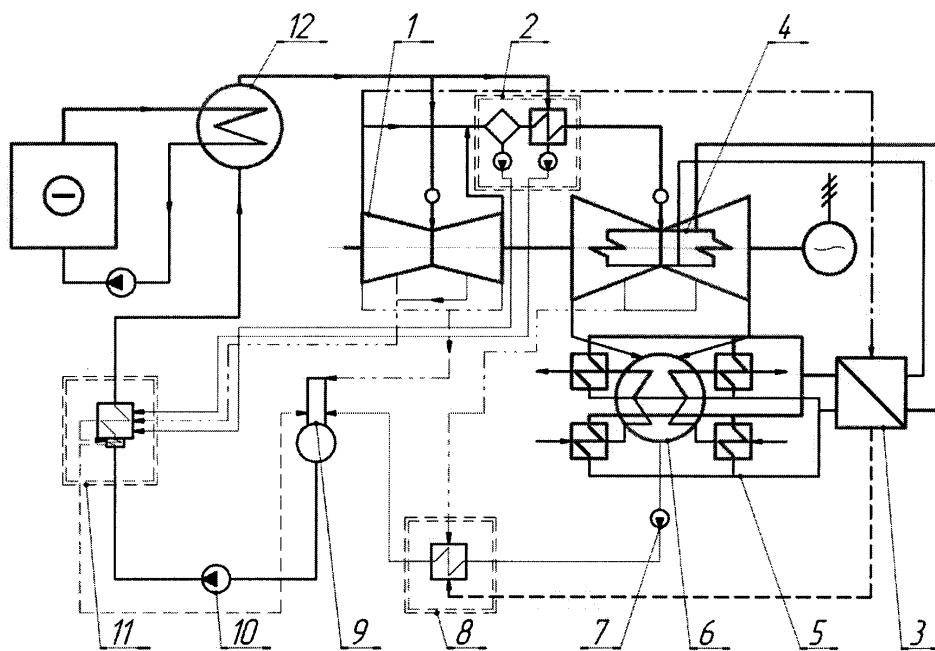


Рис. 2. Технологическая схема атомной электростанции
(патент на полезную модель RU 147663 U1 [2]).

3. Атомная электрическая станция.

(патент на полезную модель RU 170194 U1 [3], 18.04.2017 г.)

Атомная электрическая станция отличается тем, что теплообменник-испаритель абсорбционного теплового насоса подключен через байпасный трубопровод к подающим и отводящим трубопроводам циркуляционной воды конденсатора паровой турбины, а

теплообменник конденсатор абсорбционного теплового насоса расположен в едином корпусе с сетевым подогревателем теплофикационной установки.

Атомная электрическая станция (см. рис. 3) состоит из ядерного реактора (1), главного циркуляционного насоса (2), парогенератора (3), цилиндра высокого давления паровой турбины (4), сепаратора-пароперегревателя (5), цилиндров низкого давления паровой турбины (6), турбогенератора (7), конденсатора паровой турбины (8), абсорбционного теплового насоса (на чертеже не обозначен), состоящего из теплообменника-испарителя абсорбционного теплового насоса (9), абсорбера абсорбционного теплового насоса (10), генератора абсорбционного теплового насоса (11), теплообменника-конденсатора абсорбционного теплового насоса (12), а также теплофикационной установки (13), включающей сетевые подогреватели (на чертеже не обозначено), конденсатного насоса (14), подогревателей низкого давления (15), деаэрата (16), питательного насоса (17), подогревателей высокого давления (18).

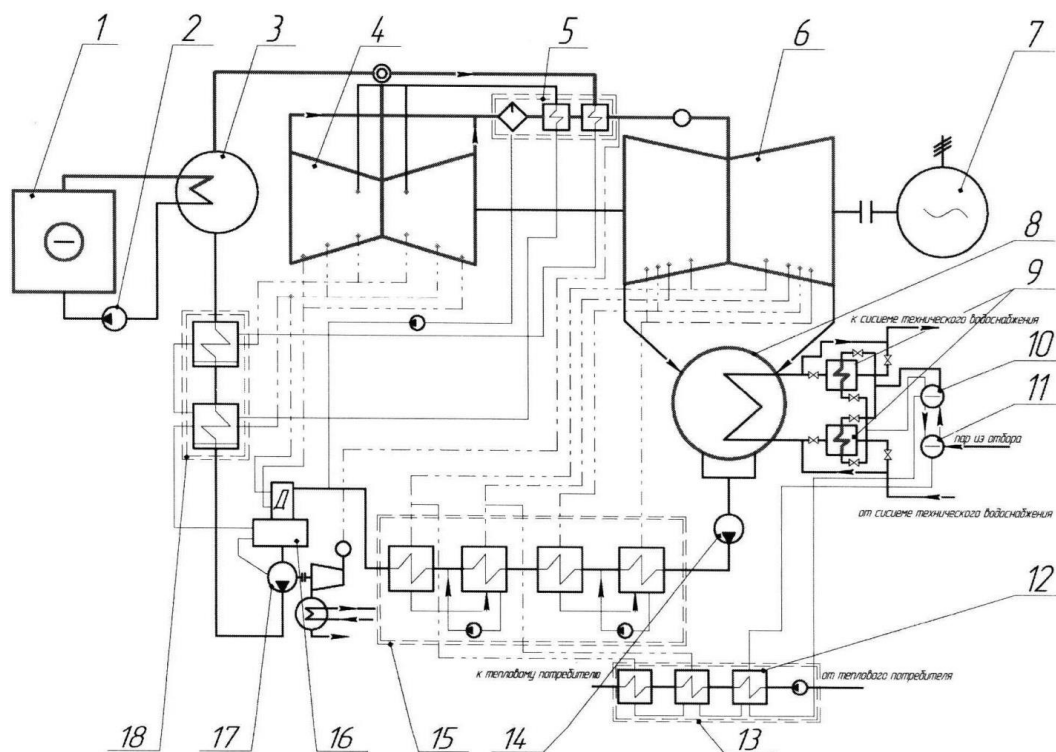


Рис. 3. Схема атомной электрической станции (патент на полезную модель RU 170194 U1 [3]).

4. Атомная электрическая станция.

(патент на изобретение RU 2638305 C1 [4], 13.12.2017 г.)

Атомная электрическая станция, содержащая реактор (1), компенсатор объема (8), парогенератор (7), паровую турбину (2), электрический генератор (3), конденсатор (4), питательный насос (5), подключенный к валу электродвигателя, циркуляционный насос (6), подключенный к валу другого электродвигателя, отличающаяся тем, что содержит насосную

турбину (10), подключенную своим входом через редуктор (9) к выходу парогенератора (7), а выходом к конденсатору (4), подключенный к выходному валу насосной турбины циркуляционный насос (6), который подключен своим входом к выходу парогенератора (7), а выходом – к входу реактора (1), подключенный к выходному валу насосной турбины питательный насос (12), который подключен своим входом к выходу конденсатора (4), а выходом – к входу парогенератора (7), выход реактора (1) через задвижку (13) подключен к входу насосной турбины (10), выход конденсатора (4) через задвижку (14) подключен к входам циркуляционных насосов (11).

5. Атомная электрическая станция.

(патент на изобретение 2720212 С1 [5], 28.04.2020 г.)

Атомная электрическая станция (см. рис. 5), содержащая главный корпус с реакторным отделением, размещенные в нем реакторы в защитной металлической оболочке и технологический кран, машинное отделение с турбинами, помещения основного технологического, инженерно-технического и вспомогательного назначения, отличающаяся тем, что она выполнена в едином строительном объеме в виде сомкнутой компоновки, а главный корпус с реакторным отделением размещен в его центральной части, в отдельно стоящем здании размещено машинное отделение с турбинами и технологическими коммуникациями и соединено с главным корпусом, причем реакторы в реакторном отделении закрыты, по меньшей мере, двумя дополнительными контурами защиты, а покрытие реакторного отделения выполнено в виде двойного контура защиты от внутренних техногенных и внешних воздействий, вокруг реакторного отделения по его периметру выполнена внешняя защитная оболочка в виде пространственной сотовой конструкции для защиты от внешних воздействий.

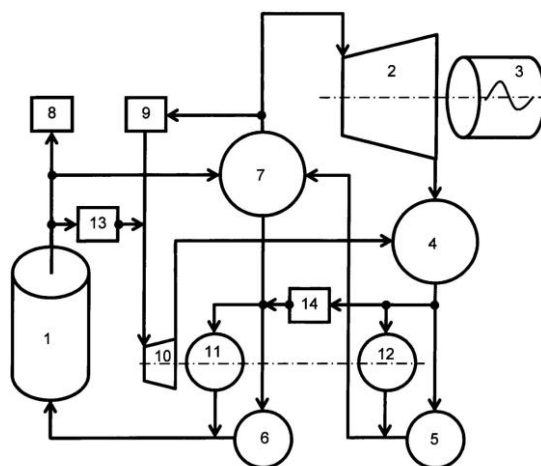


Рис. 4. Схема атомной электрической станции (патент на изобретение RU 2638305 С1 [4]).

Внешняя защитная оболочка в виде пространственной сотовой конструкции выполнена из монолитных сталежелезобетонных конструкций посредством несъемной стальной модульной опалубки с возможностью размещения в ней помещений основного технологического, инженерно-технического и вспомогательного назначения, а также для дополнительной защиты реакторного отделения от внешних насильственных воздействий.

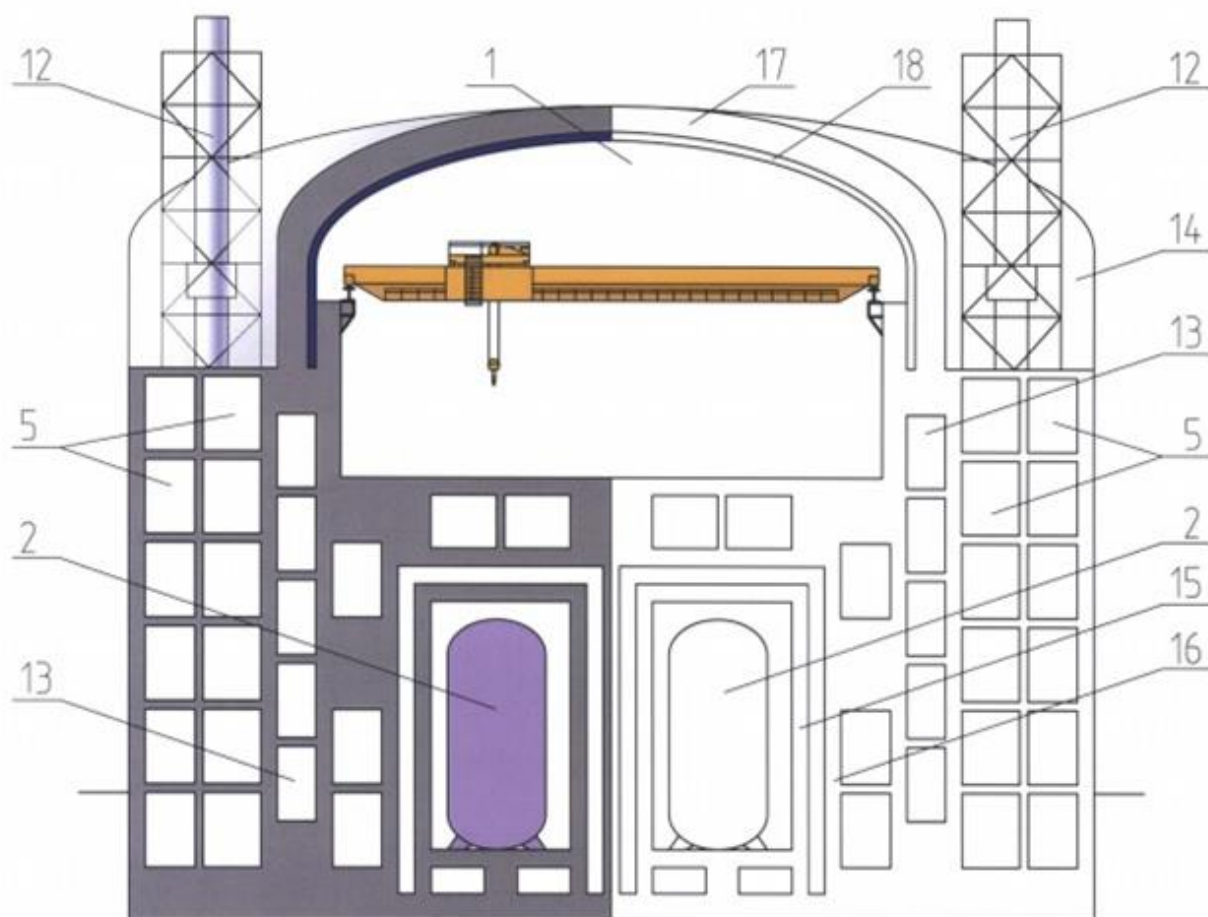


Рис. 5. Вертикальный разрез главного корпуса станции с защитными контурами ядерного реактора, реакторного отделения и контура защиты от внешних воздействий [6], где:

- 1 – реакторное отделение; 2 – реактор; 5 – защитная оболочка; 12 – вентиляционная труба;
- 13 – технологические помещения; 14 – диафрагмы жёсткости; 15 – второй контур защиты из сталежелезобетона; 16 – третий контур защиты из сталежелезобетона;
- 17 – контур защиты от внешних воздействий, 18 – модуль несъёмной стальной опалубки.

Второй и третий дополнительные контуры защиты каждого реактора выполнены в виде герметичных сталежелезобетонных защитных оболочек с использованием несъемной стальной модульной опалубки, которые изолируют реакторы в реакторном отделении и выполнены с возможностью воспринимать давление продуктов взрыва атомных реакторов и препятствовать выходу продуктов взрыва вовнутрь реакторного отделения и других помещений атомной станции. Внутренняя поверхность защитной оболочки первого контура

каждого реактора дополнительно снабжена герметичной стальной облицовкой, которая выполнена, преимущественно, из высокопрочных легированных нержавеющей сталей.

Пространственные «соты» внешней защитной оболочки выполнены в виде технологических помещений с технологическими коммуникациями, внутренние стенки и перекрытия в которых выполнены посредством несъемной стальной модульной опалубки со смещением как в плане, так и по высоте защитной оболочки. Контур защиты от внешних воздействий выполнен монолитным сталежелезобетонным посредством несъемной стальной модульной опалубки в форме свода и включает железобетонные ребра жесткости и защитную оболочку, внутренняя поверхность которой выполнена из несъемной стальной модульной опалубки.

Одна из основных задач инновационного и экономического развития Российской Федерации – повышение конкурентоспособности производимой продукции и оказываемых услуг на инвестиционно-строительных рынках за счет модернизации строительных технологий и технического перевооружения существующих производственных мощностей промышленности, включая строительные материалы и конструкции [7].

Поэтому формирование научного мнения о применимости инноваций по основным направлениям строительной деятельности, публикации материалов по передовым изобретениям в части технологий, продукции, изделий, материалов, конструктивных решений для строительной отрасли и сопутствующих отраслей экономики актуально для последующего развития российского общества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильюша А. В. Атомная электрическая станция // Авторское свидетельство SU 1828710 A3, 30.12.1994 г.
2. Ефимов Н. Н., Скубиенко С. В., Янченко И. В. Атомная электрическая станция // Патент на полезную модель RU 147663 U1, 10.11.2014 г.
3. Скубиенко С. В., Янченко И. В., Бабушкин А. Ю. Атомная электрическая станция // Патент на полезную модель RU 170194 U1, 18.04.2017.
4. Лещенко В. В. Атомная электрическая станция // Патент на изобретение RU 2638305 C1, 13.12.2017 г.
5. Анпилов С. М., Малинин С. М., Сахаров Г. С., Анпилов М. С., Римшин В. И., Сорочайкин А. Н., Китайкин А. Н. Атомная электрическая станция // Патент России 2720212. 2020. Бюл. № 13.

6. Атомная электрическая станция с защитными контурами от внешних воздействий // С. М. Анпилов [и др.] // Опытнo-кoнстpуктopские научные исследования: сб. ст. – Тольятти: ИССТЭ, 2021. – С. 13–15. DOI: 10.51608/9785604461662_13
7. Петров В. В., Мурашкин В. Г. О необходимости создания единой базы данных перспективных инновационных исследований в строительной отрасли // Эксперт: теория и практика. – 2021. – №1(10). – С. 11–12.

КОРОТИН А. И., ЛАЗАРЕВ А. Л., ЛАЗАРЕВ Г. А.,

БУСАРГИН Д. А., ТАРАСОВ С. М., КОЛЕСНИКОВ Д. В.

**ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫСОТНОГО ДОМОСТРОЕНИЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Аннотация. В работе приведен анализ современных деревянных конструкций для высотных сооружений. Рассмотрены примеры реализации проектов сооружений с применением деревянных и гибридных конструкций. Представлены актуальные проблемы строительства деревянных высотных зданий.

Ключевые слова: деревянные конструкции, высотные жилые дома, CLT-панели, LVL-брус, технологии строительства с применением гибридных деревянных конструкций.

KOROTIN A. I., LAZAREV A. L., LAZAREV G. A.,

BUSARGIN D. A. TARASOV S. M., KOLESNIKOV D. V.

**PROBLEMS OF HIGH-RISE HOUSING CONSTRUCTION TECHNOLOGIES
WITH USE OF MODERN WOODEN STRUCTURES**

Abstract. The paper presents an analysis of modern wooden structures for high-rise buildings. The options for the implementation of projects using wooden and hybrid structures are considered. The current problems of construction of wooden high-rise buildings are discussed.

Key words: wooden structures, high-rise residential buildings, CLT-panels, LVL-beams, construction technologies with use of hybrid wooden structures.

Уровень развития государства характеризуется, в том числе, и умением распоряжаться своими природными богатствами. Для нашей страны одним из основных богатств является лес. Он занимает в России обширные площади и может быть успешно использован в качестве источника сырья для применения в строительной отрасли. Однако, запасы качественной строительной древесины, в настоящий момент, используются крайне неэффективно. Управление лесными ресурсами в России должно стать одной из важнейших частей общегосударственной национальной политики. Распоряжением Правительства РФ N 1724-р от 26 сентября 2013г. утверждены Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года. В 2022 году вступит в силу запрет на экспорт из России необработанной древесины [1]. Но не только бережному отношению к лесным ресурсам должно уделяться повышенное внимание. Технологии изготовления продукции должны максимально полно использовать не только весь массив древесного ствола, но и отходы от обработки.

Технологии изготовления элементов деревянных конструкций, которые применяются в нашей стране, зачастую являются устаревшими и не имеют перспектив дальнейшего развития. Примером такого, к огромному сожалению, значительного отставания является отсутствие узаконенных технологий применения деревянных элементов для возведения зданий повышенной этажности.

Россия при всем своем богатстве природных ресурсов, занимает далеко не первое место среди развитых государств по использованию древесины в жилищном строительстве. Доля деревянного домостроения составляет не более 18%. Даже в Австрии, которая по этому показателю не является лидером в Европе, количество деревянных домов достигает 30% от общего количества жилых строений [2].

Общеизвестны преимущества древесины при использовании ее в строительстве. Низкая теплопроводность позволяет в 2 – 2,5 раза снизить энергозатраты на эксплуатацию зданий из древесины по сравнению с железобетонными и каменными конструкциями, даже многослойными с утеплителем в составе. Такие характеристики, как легкость, высокая удельная прочность, химическая и температурная стойкость, низкая теплопроводность, высокая (до 9 баллов) сейсмическая стойкость и т.д., зачастую дают деревянным конструкциям значительные преимущества по сравнению с конструкциями из других материалов для промышленных строительных изделий. Уникальная способность древесины впитывать из окружающего воздуха углекислый газ без разрушения структуры материала, способствует широкому применению древесины при проектировании сооружений в городской среде.

И еще одно важное свойство древесины может обеспечить высокую безопасность при эксплуатации – это пожаробезопасность. Множественными испытаниями подтверждено, что конструкции и изделия из необработанной специальными защитными составами древесины обеспечивают сопротивляемость воздействию высоких температур при пожаре не менее 45 минут. В то время как незащищенные металлические изделия в составе каркасов уже через 5 минут при температуре 90 градусов не могут обеспечить несущую способность и устойчивость формы элементов. Ученые разных стран предлагают варианты получения абсолютно негорючих деревянных конструкций. Простейший вариант – использование панелей из гипса в наружном слое многослойных конструкций. Оригинальный способ предложили инженеры из Канады. Они обугливают наружный слой древесных материалов для повышения изоляции их внутренней части и защиты от возгорания [2].

Психологическая ли это проблема или техническая, но при всех теоретических выкладках и практических наработках, обеспечению пожарной безопасности деревянных конструкций уделяется повышенное внимание. Например, в США при проектировании

деревянных каркасных домов обязательны пояса пожарной безопасности в виде вертикальных ограждающих конструкций, разделяющих участки горения более 600 кв. м., причем предел огнестойкости стен квартир составляет не менее 2 часов.

Подводя итог рассуждениям о пожарной безопасности деревянных конструкций, можно обратиться еще к одному интересному факту. В Швеции, при тушении огня, пожарным категорически запрещается входить внутрь горящего здания, перекрытия в которых, выполнены из любых строительных материалов, кроме современных деревянных.

На Западе в настоящее время постепенно развивается новое направление в строительстве – возведение офисных центров и жилых зданий с большим количеством этажей по каркасной технологии из деревянных элементов [3].

Деревянные здания большой высотности не новы и для России. С давних времен наши предки создавали сооружения, способные сопротивляться значительным эксплуатационным нагрузкам, и столетиями подтвердившими свою долговечность и надежность. В России история строительства деревянных «небоскребов» из дерева насчитывает более 300 лет. Высота храма Преображения Господня на острове Кизи 1714 года строительства составляет 37 м. 30-метровый шпиль Петропавловского собора в Петербурге в течении 140 лет оставался деревянным и лишь в середине XIX века перестроен на металлический. И в XX столетии наши соотечественники не оставили идею строительства высотных домов по традиционной технологии. С 1992 года в Архангельске бизнесмен Николай Сутягин начал строить деревянный сруб, высота которого в 2000-х годах достигла 38 м. Печально, но объект, который мог бы стать достоянием России, суд признал самовольной постройкой: в Архангельске запрещено возводить частные деревянные здания выше двух этажей без согласования с властями. Дом был частично разобран в декабре 2008 года [4].

Скорость строительства каркасов из древесины, по мнению шведских ученых, может быть значительно выше и экономичнее, в том числе и за счет меньших затрат на оборудование для монтажа и перевозки конструкций. Понятно, что, используя традиционные технологии, нельзя добиться необходимой индустриальности строительства. Современные технологии строительства предполагают использование двух современных перспективных материалов – CLT-панелей и LVL-элементов.

CLT-панели – многослойный материал, состоящий из деревянных ламелей, сложенных в ряды. Технология схожа с изготовлением фанеры, но ламели древесины имеют несравненно большую толщину. Слои склеиваются между собой и спрессовываются. Ряды располагаются крест-накрест относительно друг друга. Вертикальные ламели обеспечивают высокую несущую способность, а горизонтальные – жесткость в продольной плоскости.

Известно, что последовательное склеивание небольших по толщине слоев древесины позволяет получить массив, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками. Используя технологию последовательного склеивания слоев древесины, по аналогии с изготовлением фанеры, можно исключить влияние направленности слоев на свойства изделия. При изготовлении LVL-элементов 3-х миллиметровая нарезка шпона склеивается при параллельном направлении волокон. Это позволяет на выходе получить идеально работающий при изгибе и сжатии-растяжении элемент, в котором отсутствует негативное влияние пороков и ослаблений.

В качестве исходного сырья для LVL-элементов используются хвойные породы древесины. Известно, что в клееных композитах влияние породы на эксплуатационные свойства не столь значительно, поэтому на передний план выходит эстетическая составляющая. Более привлекательный вид по мнению ряда зарубежных производителей имеют, например, изделия из бука. К тому же, готовый LVL-брус из него получается на 50% прочнее, чем его аналог из хвойных пород древесины. Клееные элементы технологически позволяют получать изделия значительной длины. Например, стандартная плита фирмы Pollmeier при толщине 40, 60 и 80 мм и ширине до 1850 мм может достигать в длину 18 м и более. Уже готовая плита раскраивается по спецификации заказчика [5].

Технология применения LVL не является для России абсолютно новым технологическим процессом. Первый завод по производству клееных LVL-конструкций был построен в Югре. Однако его продукция зачастую не находила значительного спроса на внутреннем рынке, что заставляло владельцев предприятия перенаправлять высокотехнологическое производство на выпуск фанеры и других менее ответственных конструкций. Более заметными объемы производства российских клееных элементов для деревянных каркасов стали после введения в строй завода в Торжке, специализирующегося на производстве LVL-бруса для изготовления стоек каркаса и перекрытий, и крупного, даже по европейским меркам, Сокольского деревообрабатывающего комбината в Вологодской области по производству CLT-панелей.

Наибольшее распространение LVL-брус получил в коммерческом строительстве, особенно там, где требуются большепролетные конструкции. Экономические и практические преимущества применения изделий из клееного бруса подтверждены опытом применения в различных областях, и перечень объектов неуклонно растет: конноспортивные комплексы, аквапарки, бассейны, торговые склады, навесные пешеходные переходы, мосты, парковые павильоны, каркасы крытых манежей (как фермовые, так и балочные), купольные и шатровые конструкции (планетарии, теннисные корты, катки) и многие другие. Деревянные

конструкции во многих случаях с успехом заменяют традиционные металлические конструкции.

Но картина перестает быть радужной после детального изучения спроса на LVL и CLT изделия на внутреннем российском рынке. В общем объеме клееных деревянных изделий, выпускаемых в России, доля LVL-бруса составляет лишь 20%. На долю клееного бруса в общем объеме производства клееных деревянных изделий приходится около 80%, но, по всей видимости, она будет сокращаться. На долю CLT-панелей еще не так давно приходилось 8 – 9%, а сейчас в ассортименте клееных строительных конструкций эта доля весьма незначительна [6].

Стоит отметить, что, несмотря на уникальные характеристики LVL-бруса, на внутреннем рынке на текущий момент он не пользуется большим спросом, в то время как объем экспорта этого продукта из России составляет 90% от общего объема произведенного бруса. Из них 40% приходится на Австралию, 20% уходит в США, еще 20% – в Европу (страны Европейского союза: Финляндию, Норвегию, Германию, Данию, Румынию и др.), 10% – в страны Ближнего Востока, ЮАР и Тайвань» [6].

При возведении высотных зданий из деревянных элементов LVL брус составляет каркас здания, а стены и перекрытия выполняются с применением CLT панелей. Узлы крепления элементов позволяют обеспечить жесткость и неизменчивость пространственного каркаса. Однако, и в случае выполнения каркаса из более традиционных материалов, создаются так называемые «ядра жесткости». Поэтому в ряде проектов реализована комбинированная технология возведения зданий. Например, реализуемый проект общежития на 400 студентов в Ванкувере, представляющий собой здание высотой 53 м, решен в LVL каркасе с перекрытиями и ограждающими конструкциями из панелей CLT. Жесткость соединений деревянных колонн и балок обеспечивается наличием стальных коннекторов. Здание разделено на несколько ядер железобетонными плитами, увеличивающими вес всей конструкции и придающими ей дополнительную жесткость [5].

Расчет каркаса здания высотой 51 м выявил своеобразный недостаток модифицированной древесины, заключающийся в ее легкости. Для увеличения устойчивости и сопротивляемости ветровым нагрузкам в конструкцию здания дополнительно были включены железобетонные плиты, разделяющие группы модулей на несколько секторов.

Причинами применения при строительстве гибридных вариантов конструкций, когда основные элементы каркаса монтируются из железобетона, а ограждающие конструкции и второстепенные балки – из композиционной древесины могут быть, в том числе, слишком высокие требования по пожарной безопасности.

Причиной использования железобетонных элементов в комбинации с деревянными является слишком малый вес конструкций. Так, в конце 2015 года в Норвегии в городе Берген введен в эксплуатацию 14-ти этажный жилой комплекс Treet Bergen. Здание возведено из 48 модулей высокой заводской готовности (в них уже были смонтированы инженерные коммуникации и выполнена отделка). Высокое качество сборки и точность подгонки элементов каркаса и стеновых ограждений обеспечили практически нулевое отклонение конструкций по вертикали (не более 3 мм) [5].

России необходимо как можно быстрее изменить отношение к многоэтажному деревянному строительству. Необходимо серьезно заняться вопросом нормативного обеспечения законности применения новых материалов и технологий строительства. Вопросы строительства общественных сооружений с применением основных несущих конструкций из древесины применительно к возведению больниц, фельдшерских акушерских пунктов, участковых медицинских пунктов, детских садов и спортивных сооружений уже не первый год обсуждаются на разных уровнях государственных органов управления. Разрабатываемый Минпромторгом России проект «Развитие деревянного домостроения на территории Российской Федерации» создает условия для увеличения объема деревянного домостроения до 20% к 2025 году.

Кроме этих, несомненно важных законодательных мероприятий, государство должно выступить в качестве заказчика на строительство пилотных проектов деревянных строений с использованием самых прогрессивных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стригин А.И. Невывозной "кругляк" [Электронный ресурс] // Российская газета – Экономика Северо-Запада. – № 230(8284). – Режим доступа: <https://rg.ru/2020/10/13/reg-szfo/chto-govoriat-eksperty-o-zaprete-eksporta-neobrabotannoj-drevesiny.html> (дата обращения 28.02.2021).
2. Кулагина Т. О., Климова А. А., Агеева Е. Ю. Многоэтажное деревянное строительство – тенденция, набирающая огромную популярность в мире [Электронный ресурс] // XI Международная студенческая научная конференция «Студенческий научный форум – 2019». – Режим доступа: <https://scienceforum.ru/2019/article/2018010574> (дата обращения 28.02.2021).
3. Жигулина А. Ю., Писарева Е. С. Перспективы и проблемы многоэтажного деревянного строительства // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и градостроительство : сборник статей / Под редакцией М. В. Шувалова,

- А. А. Пищулева, Е. А. Ахмедовой. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. – С. 434-440.
4. Свидерская М. Ю., Кучай А. С. Деревянное домостроение в России // Образование и наука в России и за рубежом. – 2020. – №10 (74). – С. 85-91.
5. Хубаев А. О., Саакян С. С., Макаев Н. В. Мировая практика в области модульного строительства // Construction and geotechnics. – 2020. – Том 11. №2. – С.99-108.
6. Яковлева Е. А., Субхонбердиев А. Ш. Рыночный потенциал инновационных продуктов лесной промышленности // Актуальные направления научных исследований XXI века. Теория и практика. – 2020. – Том 8. № 1 (48). – С. 375-379.

КУПРИЯШКИНА Л. И., УСАНОВА Е. Ю., РОДКИНА Д. А.
МОДИФИКАЦИЯ ДИАТОМИТА МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. В данной статье рассмотрены методы модификации диатомита путем термической обработки. Проведен анализ теплопроводности природного и модифицированного диатомитов. Используя результаты дифференциального термогравиметрического анализа, рассмотрены процессы изменения поровой структуры исследуемого материала под действием температуры.

Ключевые слова: диатомит, модификация, термическая обработка, пористость, химический анализ, кристаллическая решетка, микрокремнезем.

KUPRYASHKINA L. I., USANOVA Y. E., RODKINA A. D.
MODIFICATION OF DIATOMITE BY COMPLEX PROCESSING

Annotation. This article describes the methods of modification of diatomite by heat treatment. The thermal conductivity of natural and modified diatomites is analyzed. Using the results of differential thermogravimetric analysis, the processes of changing the pore structure of the material under study under the influence of temperature are considered.

Key words: diatomite, modification, heat treatment, porosity, chemical analysis, crystal lattice, microsilica.

В современном индустриальном мире широко распространено применение природных материалов. К числу таких материалов относятся и аморфные опаловые породы – диатомиты, трепелы, опоки. Диатомит является сырьем для получения строительных тепло- и звукоизоляционных изделий, относится к природным активным минеральным добавкам для строительных смесей и бетонов. В керамической промышленности диатомит применяют при производстве красок, пластмасс, бумаги; в пищевой и нефтяной промышленности – для очистки сахарных сиропов, масел и других продуктов. Кроме того, диатомит применяют для изготовления взрывчатых веществ, удаления радиоактивных веществ из воды, а также очистки промышленных сточных и жёстких вод [1].

В большинстве случаев в природных образцах диатомита содержится значительное количество воды, достигающее до 10 %, а также различных примесей, в основном, глинистого и карбонатного типа, а также зёрна кварца, полевые шпаты, глауконит и другие минералы. Основную структуру диатомита составляют опаловые тельца размером от 0,03 до 0,15 мм, которые придают породе легкость и пористость, варьирующуюся от 72 до 92 %. Плотность природных диатомитов колеблется от 0,960 до 1,250 г/см³, и зависит, главным образом, от количества глинистых примесей.

С целью придания природному диатомиту определённых потребительских свойств, его подвергают тепловой обработке, удаляя излишки воды и примеси. Для исследования процессов, происходящих при нагревании природных диатомитов, авторским коллективом проведен термогравиметрический анализ, который позволяет регистрировать изменение массы образцов при их нагревании в зависимости от температуры (TGA), изменение температуры образца в зависимости от температуры (SDTA) и скорость изменения массы в зависимости от температуры или времени нагрева (DTG). Скорость нагрева в интервале температур от 25 до 900 °С составляла 10 °С/мин. Результаты TGA, SDTA и DTG анализа диатомита Атемарского месторождения представлены на рисунке 1.

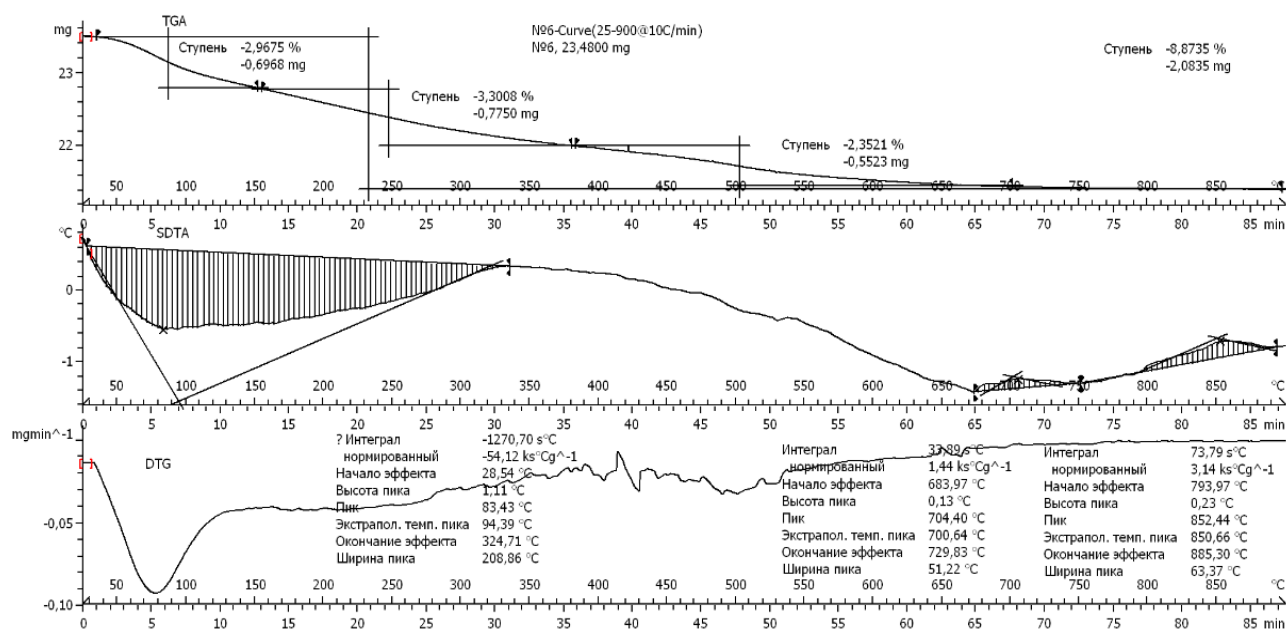


Рис. 1. TGA-, SDTA- и DTG -кривые образца диатомита Атемарского месторождения.

Кривая TGA показывает, что при нагревании навески диатомита Атемарского месторождения происходит потеря массы тремя ступенями: на первом этапе нагрева, в диапазоне температур 25–230 °С, теряется 2,97 % первоначальной массы образца; второй этап в диапазоне 230–500 °С сопровождается уменьшением массы образца еще на 3,30 %, а на третьем этапе, в интервале 500–900 °С, диатомит дополнительно теряет 2,35 % своей массы. Всего за цикл нагрева масса навески диатомита Атемарского месторождения снижается на 8,87 %. Уменьшение массы при нагреве сопровождается удалением поровой воды частиц дисперсного материала. Широкий максимум (кривая SDTA) в интервале температур 28,5–324,7 °С характеризует указанный эндотермический эффект. Пик эффекта приходится на 83,4 °С, а его ширина достигает 208 °С. Максимум кривой SDTA

соответствует наибольшей скорости потери массы образцом, которая наблюдается на первом этапе нагрева.

Кроме того, в интервалах температур 684–730 °С и 794–885 °С наблюдаются два небольших максимума. Они указывают на экзотермические реакции, которыми сопровождаются процессы выгорания остатков органических веществ и структурной перестройки фаз некоторых минералов, составляющих данную осадочную породу.

В низкотемпературной области в два этапа (30–160 и 160–365 °С) происходит удаление адсорбционной воды и части межслоевой воды глинистого минерала. При 365–505 °С наблюдается удаление поровой воды, которая содержится в диатомите в силу структурных особенностей его строения, аморфизации и частичной перестройки кристаллической решетки глинистого минерала. При температуре выше 440 °С происходит выгорание органических веществ, выделяющихся в виде CO₂, придающего растворам темно-бурую окраску. Эффект при температурах 560–580 °С связан с фазовым переходом в диатомите β-кварца в α-кварц, а при 600–750 °С – с потерями кристаллизационной воды монтмориллонитом. Потери массы при прокаливании навески диатомита при температуре 1000 °С в инертной (аргоновой) среде составили 11,29 % [2]. Подобные выводы были сделаны и в ряде других работ [3; 4].

Известно, что нанопорошки имеют низкую теплопроводность и могут быть использованы в качестве теплоизоляторов (в том числе в теплоизолирующих панелях зданий и сооружений). Применение природных материалов с собственной высокой пористостью является одним из наиболее эффективных методов получения теплоизоляционных изделий.

После модификации природного диатомита путем термической обработки до 800 °С была определена теплопроводность полученного нанопорошка. Ввиду того, что эксперимент по определению коэффициента теплопроводности осуществлялся на воздухе, было использовано допущение, что измерения проводились для смеси газов: воздуха и газа, состоящего из тяжелых частиц твердого вещества. Это допущение позволило применить для расчетов основной закон теплопроводности (закон Фурье), согласно которому вектор плотности теплового потока (q), передаваемого теплопроводностью, пропорционален вектору градиента температуры:

$$q = - \lambda \operatorname{grad} T,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Теплопроводность природного Атемарского диатомита и его модификации определяли на измерителе теплопроводности ИТС-1. Модификация диатомита проводилась методом термической обработки для увеличения прочностных показателей теплоизоляционного

материала без ухудшения его теплоизоляционных показателей. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Теплопроводность Атемарского природного диатомита

№ п/п	Плотность заполнения ячейки ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	
		Диатомит Атемарский природный	Диатомит модифицированный ($T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$)
1	200	0,149	0,132
2	220	0,152	0,135
3	240	0,159	0,147
4	260	0,177	0,159
5	280	0,183	0,174
6	300	0,196	0,184
7	320	0,206	0,196
8	340	0,206	0,206
9	360	0,211	0,206

Таблица 2

**Теплопроводность модифицированного диатомита
при плотности заполнения ячейки $\rho = 250\text{ кг/м}^3$**

Обработка диатомита	λ , Вт/(м·К)
Прокаливание при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи в течение 1 часа	0,173
Прокаливание при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи в течение 1 часа, затем СВЧ-излучение в течение 5 мин	0,168
Прокаливание при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи в течение 1 часа	0,168
Прокаливание при $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи в течение 1 часа, затем СВЧ-излучение в течение 5 мин	0,163

По данным таблицы 1 видно, что при повышении плотности заполнения ячейки, соответственно, возрастает и теплопроводность материала. При термообработке при высокой температуре ($T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) наблюдается уменьшение теплопроводности (табл. 1), но происходит спекание. Поэтому температуру обжига уменьшили, но дополнительно использовали СВЧ-излучение. Результаты представлены в таблице 2. Диатомит без предварительного прокаливания имеет коэффициент теплопроводности $0,177\text{ Вт/(м·К)}$ при кажущейся плотности $\rho = 260\text{ кг/м}^3$. После прокаливания при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ в муфельной печи в течение 1 часа теплопроводность составила соответственно $0,173$ и $0,168\text{ Вт/(м·К)}$ при кажущейся плотности $\rho = 250\text{ кг/м}^3$. После обработки СВЧ-излучением в течение 5 минут прокаленного порошка при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ коэффициент теплопроводности составил $0,168$ и $0,163\text{ Вт/(м·К)}$. По результатам проведенных исследований установлено, что дополнительное

воздействие СВЧ-излучения (2,4 ГГц) в течение 5 минут после термической обработки как при 200 °С, так и 500 °С, способствует дополнительному удалению адсорбированной воды, увеличению пористости модифицированного диатомита, что ведет к уменьшению теплопроводности дисперсной системы. Полученные таким методом порошки из природного диатомита с более низким коэффициентом теплопроводности можно использовать для получения эффективных теплоизоляционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куприяшкина Л. И., Усанова Е. Ю. Перспективы использования диатомита в строительной отрасли // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы XI академических чтений РААСН – международной научно-технической конференции, посвященной памяти первого председателя научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», почетного члена РААСН, доктора технических наук, профессора Зайцева Юрия Владимировича. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – С. 96–101.
2. Филиппович Е. Н., Хацринов А. И., Скворцов А. В., Сулейманова А. З. Выбор оптимальных условий термической обработки диатомита инзенского месторождения ульяновской области для синтеза кристаллических силикатов натрия // Вестник технологического университета. – 2010. – № 5. – С. 83–86.
3. Куприяшкина Л. И., Осипов А. К., Савинова О. Н., Седова А. А., Селяев В. П. Влияние температуры прокаливания природного диатомита на качество синтезированного кремнезема [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2017. – № 16. – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/vliyanie-temperatury-prokalivaniya-prirodnogo-diatomita-na-kachestvo-sintezirovannogo-kremnezema> (дата обращения 18.02.2021).
4. Глызина А. Э. Разработка технологии производства теплоизоляционных материалов для металлургической промышленности на основе сырья Уральского региона: магистерская диссертация. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий, 2018. – 72 с.

СЕЛЬДЮШОВ А. А., НИЗИНА Т. А., ОШКИНА Л. М.

АНАЛИЗ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ AUTODESK REVIT И ПК ЛИРА 10.10

Аннотация. Приведены основные сведения о программных продуктах Autodesk Revit и ПК ЛИРА 10.10. Продемонстрирована связка двух программных комплексов, работающих в двустороннем режиме.

Ключевые слова: информационное моделирование, Autodesk Revit, аналитическая модель, расчет, ПК ЛИРА 10.10.

SELDYUSHOV A. A., NIZINA T. A., OSHKINA L. M.

ANALYSIS OF JOINT WORK OF AUTODESK REVIT AND SP LIRA 10.10

Abstract. The article provides basic information about Autodesk Revit software products and SP LIRA 10.10. A joint work of two software systems operating in two-way mode is demonstrated.

Keywords: information modeling, Autodesk Revit, analytical model, calculation, SP LIRA 10.10.

В последние годы в России широко используется информационное моделирование в строительстве (BIM), представляющее процесс общего построения и использования информации о здании и сооружении, а также создание основы для решения задач, возникающих на всех этапах жизненного цикла объекта (от зарождения идеи до эксплуатации и сноса). BIM (Building Information Modeling) представляет собой комплексную систему, объединяющую в себе на каждой стадии процесса информационного моделирования некую информационную модель, которая отражает объем полученной на этот момент информации о здании [1]. Не так давно идея о взаимосвязи нескольких совершенно разных по структуре программ, что как раз из себя представляют BIM технологии, была не выполнима и инженеру конструктору приходилось создавать один и тот же объект как в архитектурно-строительных программах (Revit, ArchiCAD, Allplan и др.), так и в расчетных комплексах (ПК ЛИРА, ЛИРА САПР, SCAD Office, Stark и др.).

С появлением трехмерного моделирования конструкций архитекторами, многие разработчики программных комплексов разработали подпрограммы (а некоторые и препроцессоры) для работы с моделями из программ архитектурно-строительного направления [2–4]. Так, например, в ПК ЛИРА существуют конструктивные элементы, которые можно создавать как в самой программе, так и экспортировать из Revit. В настоящее время такая связка работает в двустороннем режиме – обратно из ПК ЛИРА 10.10 передается в Revit армирование (см. рис. 1).

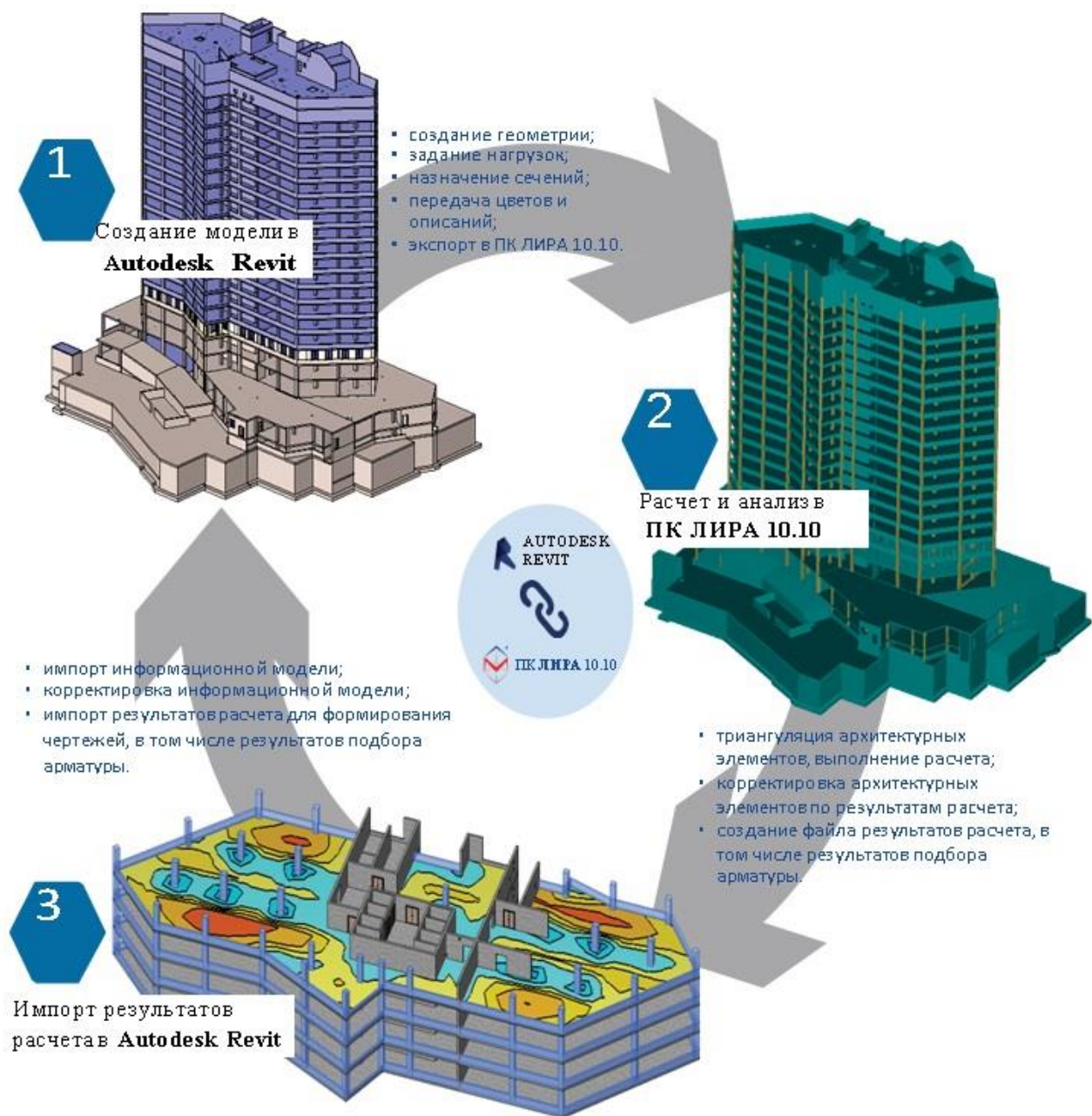


Рис. 1. Взаимосвязь Autodesk Revit и ПК ЛИРА 10.10 [5].

Autodesk Revit – это один из наиболее широко используемых программных продуктов для информационного моделирования зданий. Ее главной особенностью является то, что при создании несущих конструкций здания, параллельно с физической моделью (см. рис. 2), создается аналитическая модель здания (см. рис. 3), которая содержит данные о нагрузках, типах нагрузок и их комбинациях, информацию об опорах и узлах, а также о свойствах материалов и конструкций (см. рис. 4) [6].

Проиллюстрируем взаимодействие двух программных комплексов на примере объекта, реализованного в рамках обучающего курса «Совместная работа ЛИРА 10 и Autodesk Revit»

от компании разработчика ООО «ЛИРА софт», пройденного Сельдюшовым А.А. в январе 2021 [7].

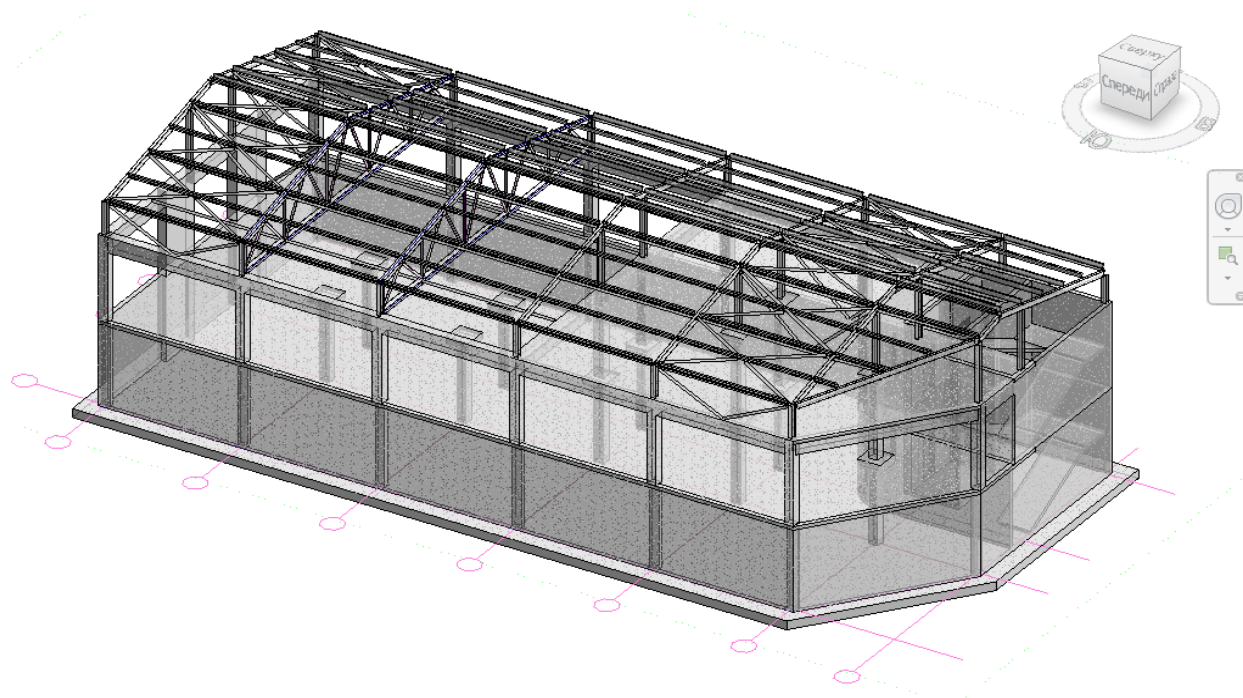


Рис. 2. Физическая модель здания в Autodesk Revit.

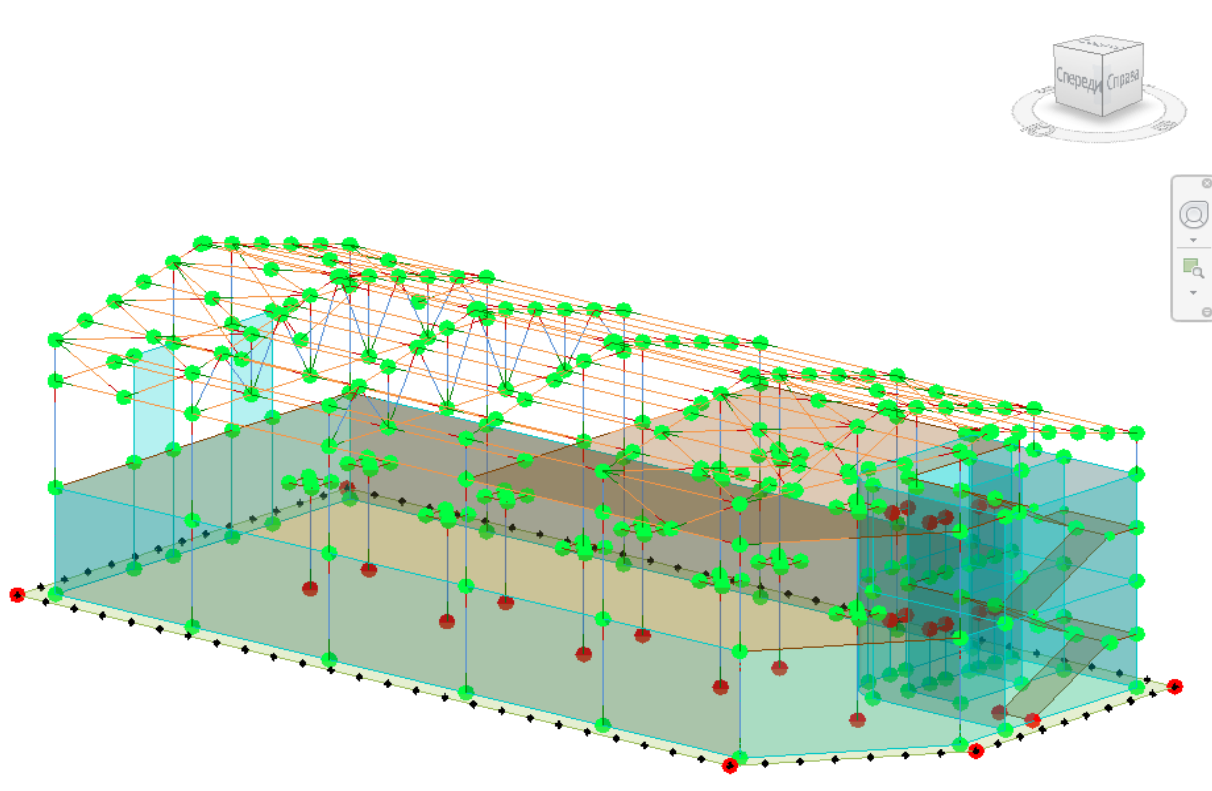


Рис. 3. Аналитическая модель здания в Autodesk Revit.

Объектом исследования связки двух программных продуктов было выбрано 2-х этажное промышленное здание с простой в плане конфигурацией, максимальные размеры в осях $34,5 \times 15,0$ м. Конструктивная схема здания представляет собой раму, состоящую из

железобетонных колонн и несущих конструкций покрытия в виде металлических ферм. Фундамент здания запроектирован в виде сплошной монолитной железобетонной плиты толщиной 800 мм из тяжелого бетона класса В25. Перекрытие выполнено в виде монолитного безбалочного перекрытия из железобетона толщиной 160 мм. Стены здания – монолитные железобетонные толщиной 200 мм, материал – бетон В25. Колонны с отметки -4,000 м до отметки +3,800 м – монолитные железобетонные сечением 400×400 мм из тяжелого бетона В25. Металлическая ферма трапецевидной формы, нижний и верхний пояс выполнен из двутавровой балки с параллельными гранями полок типа К (ТУ 14-2-24-72) 20К1, раскосы и стойки из трубы прямоугольного сечения (ТУ 36-2287-80) 100×60×6.

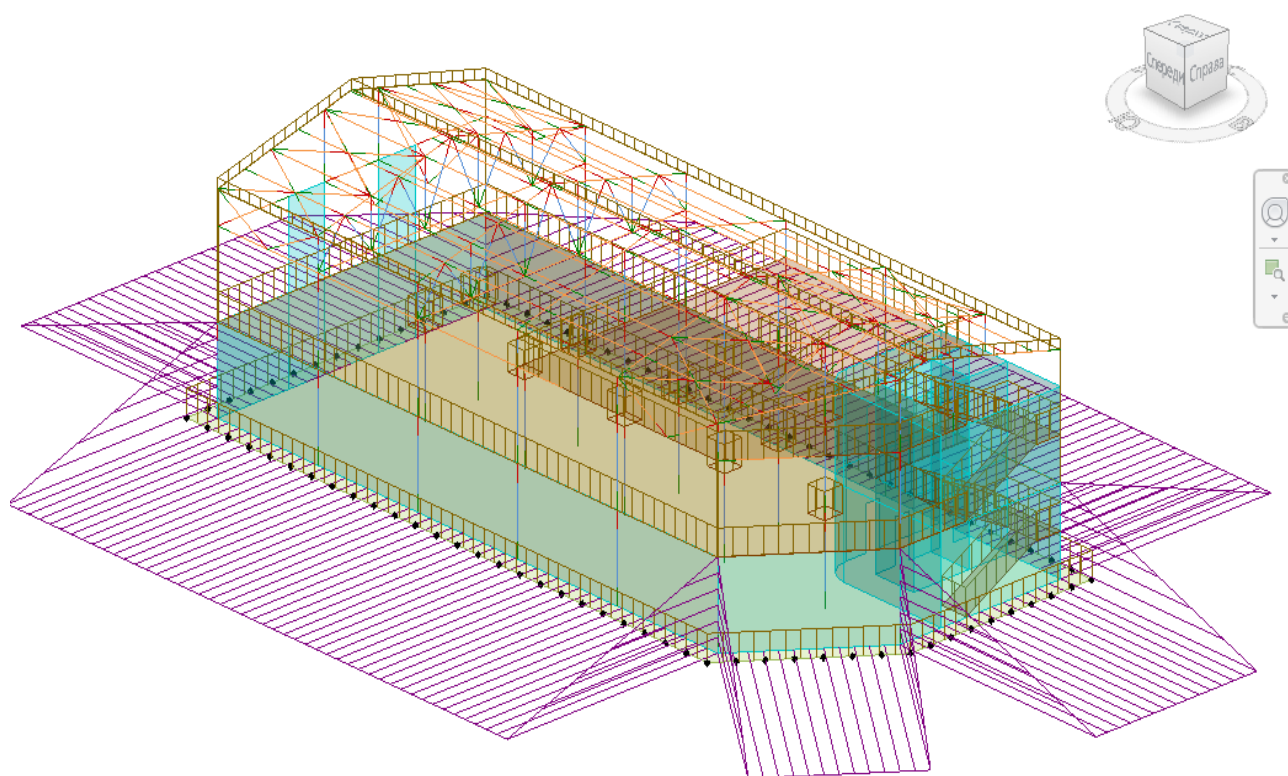


Рис. 4. Аналитическая модель здания с приложенными нагрузками в Autodesk Revit.

Данные, содержащиеся в аналитической модели программы Autodesk Revit, могут быть использованы в расчетном комплексе ЛИРА 10.10 (см. рис. 5–6). При проведении последующих расчетов в ПК ЛИРА 10.10, между программами осуществляется двусторонняя связь по передаче данных. Таким образом, после проведения необходимых расчетов, модель в программе Autodesk Revit может быть автоматически обновлена с учетом полученных результатов.

По итогу рассмотрения связи Revit – ПК ЛИРА 10.10, можно сказать, что она значительно экономит время инженера-конструктора, а также сводит к минимуму ошибки, которые могут быть допущены при построении аналитической модели в ПК ЛИРА в ручную.

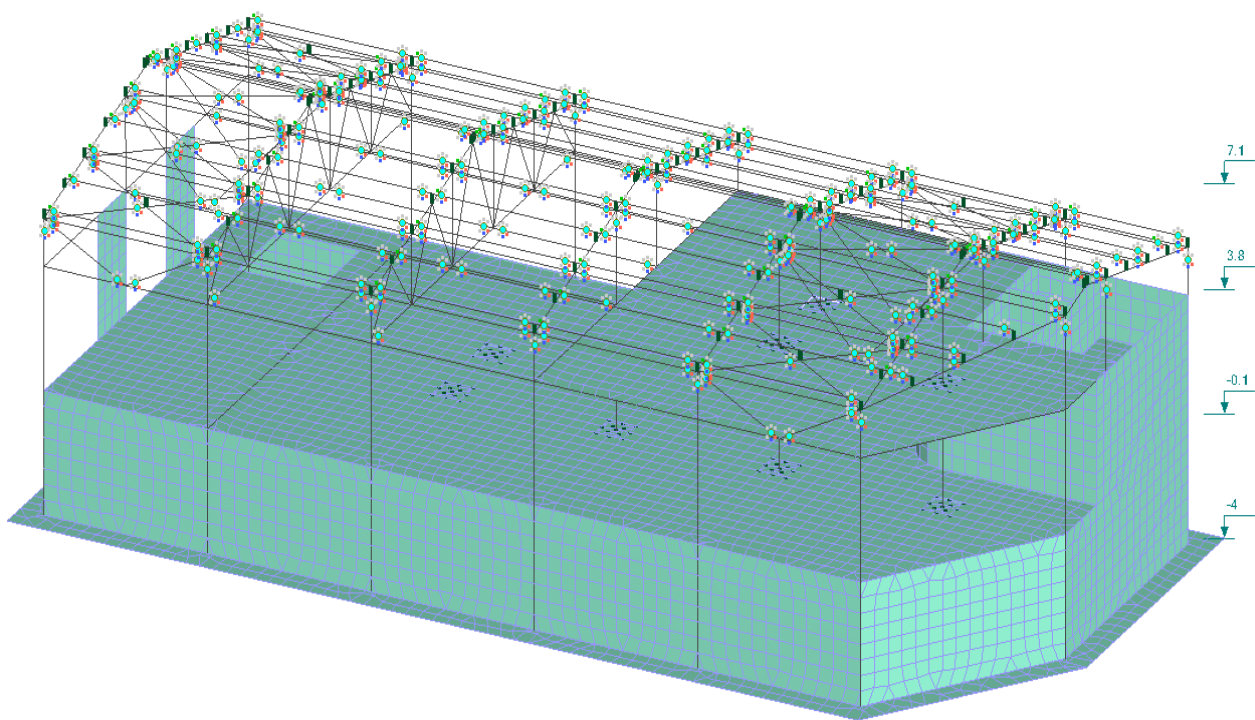


Рис. 5. Аналитическая модель здания, обработанная с помощью
расчетного комплекса ПК ЛИРА 10.10.

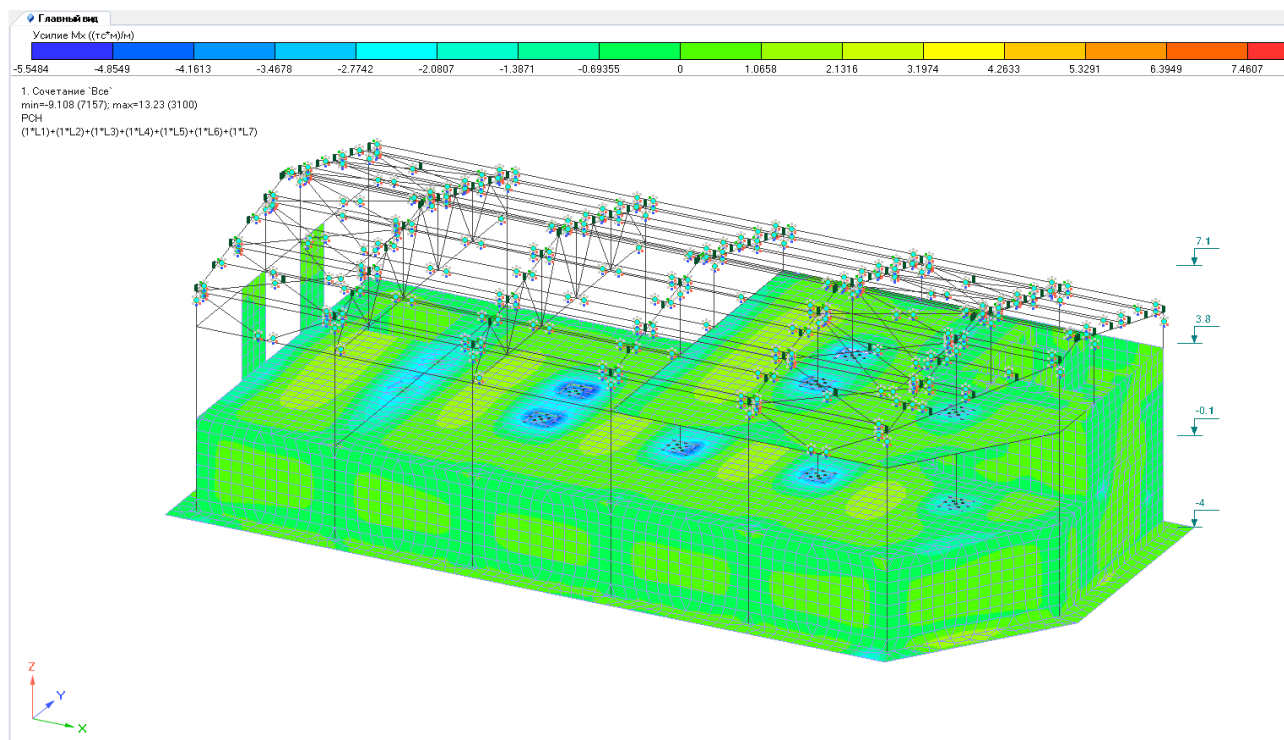


Рис. 6. Аналитическая модель здания с усилиями M_x , полученными с помощью
расчетного комплекса ПК ЛИРА 10.10.

На текущий момент данная связка продолжает свое развитие в сторону облегчения рутинных операций для проектировщика и повышения качества при использовании кардинально разных программных комплексов для решения сложных задач современного проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Талапов В. В. Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 410 с.
2. 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.
3. 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 20.04.2021).
4. Паршина С. В., Низина Т. А. Российский программный BIM-комплекс Renga // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию засл. деятеля науки РФ, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селева В.П. (3-5 дек. 2019 г.). – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 245–250.
5. ПК ЛИРА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://support.ascon.ru/source/info_materials/2016/2016-booklet-LIRA-10.4.pdf (дата обращения 20.03.2021).
6. Autodesk Revit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.ru/products/revit/> (дата обращения 20.03.2021).
7. Совместная работа ЛИРА 10 и Autodesk Revit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lira-soft.com/learning/lira-10-revit-videocourse> (дата обращения 20.03.2021).